

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Problematika nesymetrie při provozu jednofázové vozby
Unbalance by Supplying of Electric Railways

2010/2011

Tomáš Sladkovský

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne

.....
Tomáš Sladkovský

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Josefu Palečkovi, CSc., za odborné rady, bez kterých by tato práce nevznikla.

Abstrakt

Je mnoho nežádoucích vlivů, které mohou mít nepříznivý dopad na trakční napájecí soustavu. Podle druhu napájecího napětí se napájecí soustava dělí na střídavou a stejnosměrnou. Obě dvě tyto soustavy mají různé nepříznivé vlivy na napájecí soustavu. Hlavní náplní této práce bylo posoudit nepříznivý vliv nesymetrie při provozu jednofázové vozby a její možnou eliminaci nebo technické řešení. Bylo provedeno jedno měření v trakční napájecí stanici Svitavy. Hodnoty získané měřením byly zpracovány a vyhodnoceny programem Excel 2007.

Klíčová slova

Elektrická vozba, nepříznivé vlivy, nesymetrie napětí, trakční transformátor, transformovna

Abstract

There are many adverse effects that may have an adverse effect on the traction power supply system. Depending on the power supply voltage system is divided into AC and DC. Both these systems have various adverse effects on the power system. The main contains of this study was to assess the adverse effects of asymmetry in the operation phase of the chariots and the possible elimination or technical solution. One measurement was performed in substations Svitavy. The values of the measurements obtained were processed and evaluated by Excel 2007.

Key words

Electric traction, averse influence, voltage unbalance, traction transformer, transformer station

Obsah:

1 Úvod	1
2 Připojení elektrických drah k elektrizační soustavě	3
2.1 Stejnosměrné trakční proudové napájecí soustavy	3
2.2 Střídavé trakční proudové soustavy průmyslového kmitočtu	4
2.3 Trakční měnírny.....	4
2.4 Trakční transformovny	5
2.5 Možnosti napájení trakční sítě	7
2.5.1 Jednostranné napájení	7
2.5.2 Dvoustranné napájení	8
2.5.3 Čtyřstranné napájení.....	9
2.6 Typy trolejového vedení.....	9
2.6.1 Vedení prosté	10
2.6.2 Vedení řetězovkové nekompenzované	10
2.6.3 Vedení řetězovkové polokompenzované.....	11
2.6.4 Vedení řetězovkové plněkompenzované	12
3 Nesymetrické zatěžování elektrizační soustavy při napájení elektrizovaných tratí.....	13
3.1 Složkové soustavy.....	14
3.2 Klasifikace nesymetrie a nevyváženosti	15
3.3 Přibližný výpočet napěťové nesymetrie při 1-fázové zátěži.....	16
3.4 Výpočet proudové nesymetrie při připojení T transformátoru	18
3.5 Výpočet proudové nesymetrie při připojení V transformátoru	19
3.6 Kompenzace nesymetrie při provozu 1-fázové vozby.....	21

3.6.1 Scottův transformátor	21
3.6.2 Transformátor v zapojení Y/D-1, Y/D-11	22
3.6.3 Leblancův transformátor	22
3.6.4 Statické filtry	23
3.7 Měření napěťové nesymetrie	24
3.7.1 Měření statickými filtry	24
3.7.2 Měření rotačními filtry	24
3.7.3 Měření na základě přímé aplikace Fortescueovy metody s využitím virtuální instrumentace	25
4 Měření na vybrané transformovně	26
4.1 Měřicí aparatura a její připojení v trakční transformovně	29
4.2 Měřené veličiny	31
4.3 Výsledky měření	32
4.3.1 Průběhy napětí	32
4.3.2 Průběhy proudu	35
4.3.3 Průběhy součinitele napěťové nesymetrie	37
4.3.4 Srovnání podobnosti grafu napěťové nesymetrie a výkonu	39
4.3.5 Korelace	41
5 Závěr	42
6 Použitá literatura	43

1 Úvod

Moderní člověk si dnes asi těžko dokáže představit svět bez elektrických drah. Každý den na celém světě přepraví tisíce osob nebo tun materiálu. Jsou součástí dopravy každého vyspělého státu. Největší hustotou železniční sítě (přes 100 Km/ 1000 Km²) má Německo, Belgie a Švýcarsko, ale také Česká republika. Zdokonalování železniční dopravy se realizuje zaváděním nových typů motorů, vlaků bez kol - pohybují se na vzdušném polštáři nebo na magnetických či elektromagnetických závěsech. V této souvislosti prudce rostou rychlosti vlaků (na hlavních magistrálách Japonska činí v průměru 220 - 230 km/h, expres New York - Washington jezdí rychlostí 200 km/h). Nejfrekventovanější trasou osobní železniční dopravy na světě je trať Moskva - Sankt Petěrburg v Rusku s roční kapacitou 12 miliónů cestujících.

V České republice je udržováno 9513 km tratí, z čehož asi pětina je dvojkolejná. Na těchto tratích je bezmála 2700 železničních stanic a zastávek. Elektrifikováno je u nás stejnosměrným proudem 3000 V 1621 km tratí. Tzv. první hlavní tah vede v ose Děčín – Ústí n. L. - Praha – Kolín – Česká Třebová – Přerov – Hranice n. M. – Bohumín – Mosty u Jablunkova a některé další přilehlé traťové úseky nebo odbočky. Střídavým proudem 25000 V je u nás elektrifikováno 1086 km tratí. Tzv. druhý hlavní tah vede v ose Cheb – Plzeň – České Budějovice – Havlíčkův Brod – Brno – Břeclav a přilehlé traťové úseky a odbočky.

I přes stále se navyšující podíl automobilové dopravy železnice neztrácí na svém významu ale spíše naopak. Důvodů je hned několik. Jeden z hlavních bude asi ekonomická výhodnost železniční dopravy oproti všem ostatním způsobům dopravy. Ze všech moderních způsobů dopravy, které lze uvažovat v našich zeměpisných podmínkách, je jednoznačně energeticky nejméně náročná. Z toho vyplývá další skutečnost a to že k poměru kolik přepraví zboží a jak znečišťují ovzduší a zatěžují životní prostředí je železniční doprava taky považovaná za ekologickou a to především hovoříme-li o elektrických drahách. Nevýhodou můžou být velké počáteční investiční náklady, pokud by se budovaly nové traťové koridory.

S ubýváním nerostných surovin jako je především ropa a uhlí se dá předpokládat, že bude stále více využívána pro její nízkou energetickou náročnost.

2 Připojení elektrických drah k elektrizační soustavě

Velké výkony se přenášejí na velké vzdálenosti z elektrárny směrem ke spotřebiči přenosovou soustavou velmi vysokého nebo zvlášť vysokého napětí (220 kV, 400 kV). To se děje z důvodů ztrát. Pokud by se napětí netransformovalo na větší hodnotu, byly by ztráty při přenosu na velké vzdálenosti příliš velké, protože ztráty jsou rovné druhé mocnině proudu. Přímou do míst spotřeby se elektrická energie rozvádí distribučními sítěmi vysokého napětí (110 kV, 35 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV). Mezi přenosovou soustavou a distribuční sítí je transformovna, která transformuje napětí na nižší hodnotu. Dále se je provedena transformace na nízké napětí a elektrická energie je rozvedena k jednotlivým spotřebitelům místními městskými a průmyslovými sítěmi.

Elektrické dráhy jsou u nás napájeny z trakčních měníren (stejnosemřný proud 3000 V), nebo z trakčních transformoven (střídavý proud 25 kV, 50 Hz). Trakční transformovny 25 kV, 50 Hz jsou u nás napájeny z distribuční sítě vysokého napětí 110 kV. V případě trakčních měníren se nejdříve do prostoru měnírny přivede napětí 110 kV, které se zde transformuje na 22 kV a teprve potom se přivádí do měnírny. Tímto se zamezí větším ztrátám v přívodním vedení.

2.1 Stejnosemřné trakční proudové napájecí soustavy

K napájení stejnosemřných drah se používá trakčních měníren. V těchto trakčních měnírnách se 3-fázová energetická soustava usměřňuje na stejnosemřnou. Je nutná určitá tolerance napájecího napětí a to z důvodu, že se při jízdě pohybujeme mezi dvěma napájecími stanicemi. Při takovém pohybu máme proměnlivý odpor trakčního vedení v závislosti na vzdálenosti od napájecí stanice. Tím se také mění napětí na sběračích trakčního vozidla. Z těchto důvodů je třeba vysoká tolerance napájecích napětí (+20% a -33%). Oproti průmyslovým provozům jsou kladené velké nároky na výrobce a provozovatele elektrických trakčních zařízení. Napájecí stanice musí být od sebe vzdáleny 15 až 35 km pro 3kV.

Jmenovitá napětí stejnosemřných soustav:

- 250V pro důlní dráhy hlubinných dolů
- 600V pro pouliční dráhy tramvajové a trolejbusové
- 750V pro rychlé městské dráhy, trolejbusové dráhy a podzemní dráhy
- 1 500V pro hlavní a vedlejší železniční tratě a pro průmyslové dráhy
- 3 000V pro hlavní železniční tratě

2.2 Střídavé trakční proudové soustavy průmyslového kmitočtu

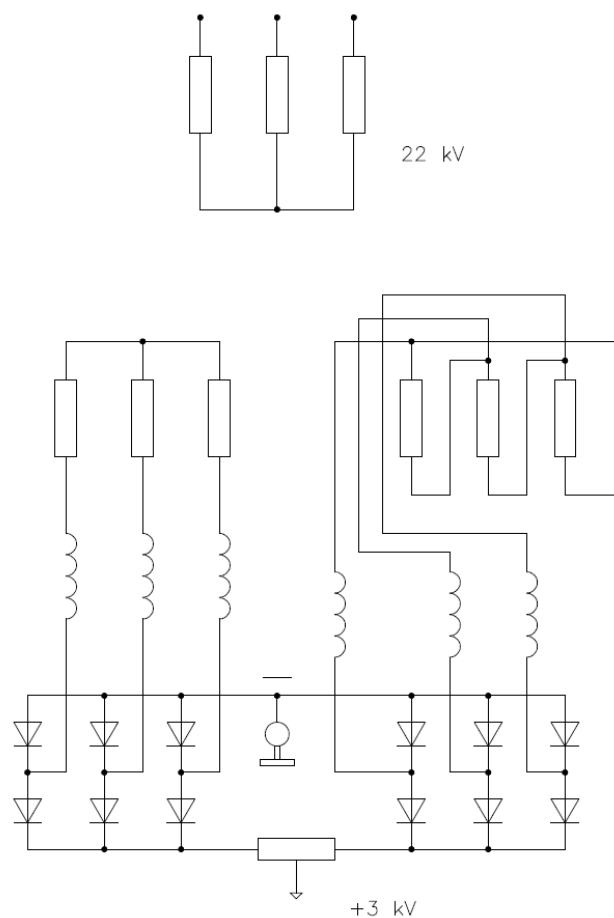
Střídavé dráhy jsou napájené z trakčních napájecích stanic, které se pro tyto dráhy nazývají trakční transformovny. Střídavé dráhy pracují na kmitočtu 50Hz, pouze v některých zemích jako je USA nebo Japonsko pracují na kmitočtu 60Hz. Rozvoj jednofázových drah průmyslového kmitočtu umožnil až vývoj výkonové elektroniky. Tento vývoj umožnil konstrukci lokomotiv s diodovými a tyristorovými usměrňovači. To umožňuje napájení lokomotivy napětím 25kV a tím jsou proudy odebírané z troleje menší. Díky tomuto faktu je možno používat lehčích trakčních vedení a zvětšit vzdálenosti mezi dvěma pájecími stanicemi. Tato vzdálenost je 40 a 50 km. Nevýhodou je větší cena hnacích vozidel oproti stejnosměrným drahám.

Jmenovitá napětí jednofázových trakčních proudových soustav průmyslového kmitočtu:

- 15, 20, 25, 50kV – 50Hz pro hlavní železniční tratě
- 6, 10kV – 50Hz pro průmyslové dráhy
- 0,4kV – 50Hz pro hlubinné doly

2.3 Trakční měnírny

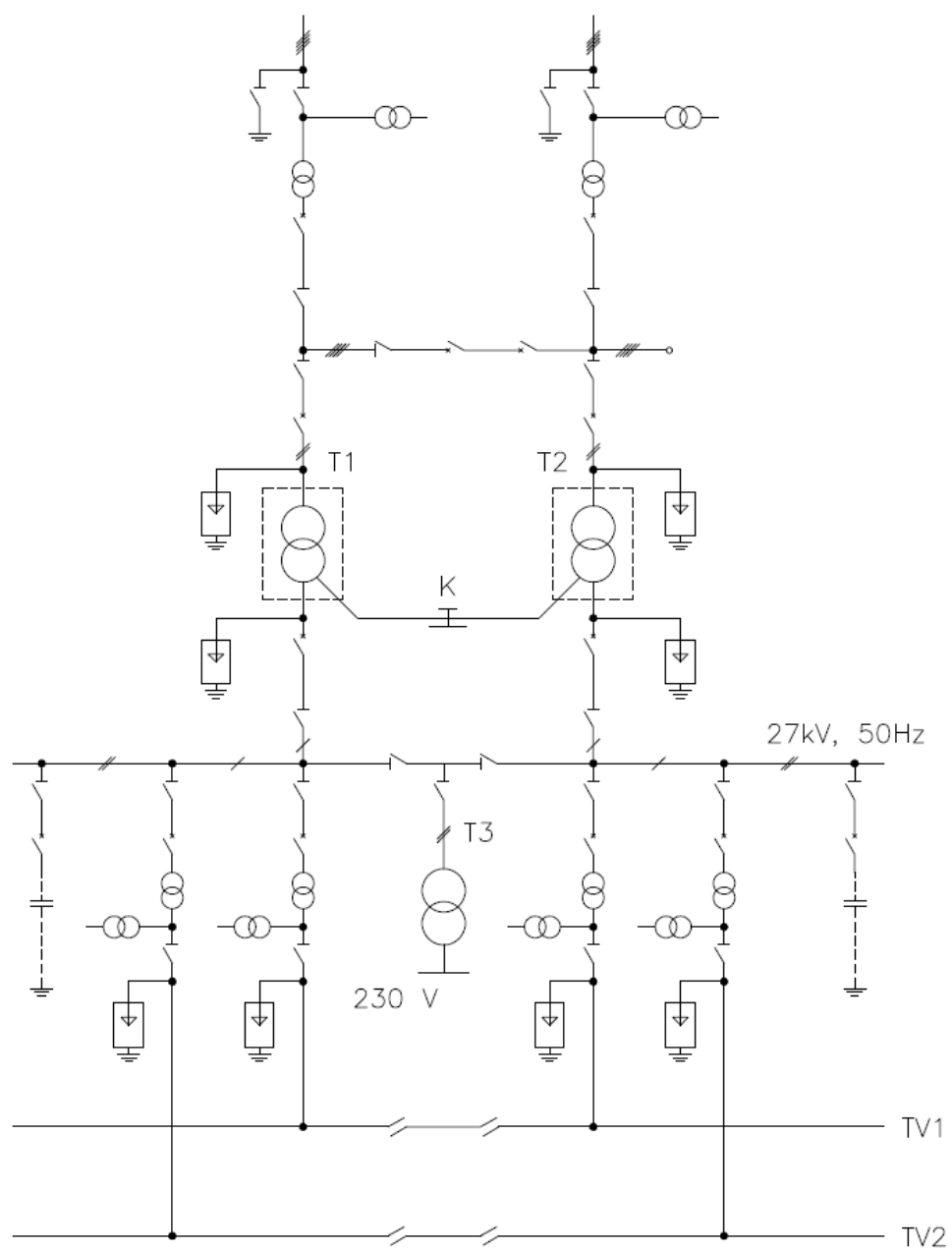
V celosvětovém měřítku je nejčastější soustavou pro hlavní železniční dráhy stejnosměrná soustava 3 kV. Trakční měnírny usměrňují 3-fázové napětí ze sítě pomocí usměrňovačů. Dříve se používaly rtuťové usměrňovače, které byly v současnosti nahrazené výkonovými polovodičovými usměrňovacími jednotkami o výkonu 5 až 10 MW. Měnírny v ČD se používají s takzvaným mezistupněm. Do měnírny je přivedeno napětí 110 kV, které se nejprve transformuje na 22 kV a teprve potom se usměrňuje na 3kV stejnosměrných. Každá měnírna má taky transformátory vlastní spotřeby 22/0,4 kV. Tyto transformátory zajišťují napájení zařízení přímo v měnírně. Měnírna má střídavou a stejnosměrnou část. Střídavou tvoří rozvod 110 kV a 22 kV a příslušné transformátory. Stejnosměrnou část tvoří rozvodna 3 kV a usměrňovací jednotka.



Obr.2 - Schéma trakční měřírny

2.4 Trakční transformovny

Spojení elektrizační soustavy s jednofázovou trakční soustavou při zachování stejného kmitočtu se provádí pomocí trakčních transformoven. Tyto transformovny jsou v podstatě tvořeny olejovými transformátory o jmenovitých výkonech až 10MVA, při ochlazování až 13,3MVA. Používají se jednofázové trakční transformátory. Jeden úsek tratě je napájen z jedné fáze. Při plném zatížení je jmenovité napětí 27kV. Důležité je, aby trať byla rozdělena na přibližně stejně zatížené úseky, to z důvodů nesouměrnosti, která nesmí překročit 20% základního trojfázového zatížení.



Obr.3 - Schéma trakční transformovny

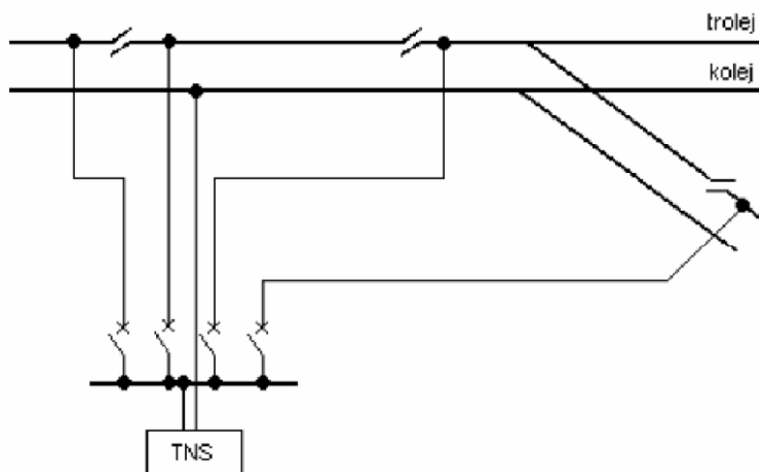
2.5 Možnosti napájení trakční sítě

Trakční síť je napájena z trakčních napájecích stanic. Tato síť se dělí na napájecí úseky, a to z důvodů omezení velikostí lokalizace poruch a k omezení velikostí napájecích proudů. Napájecí úseky od sebe musí být vzájemně izolovány a musí mít vlastní zdroj napájení. Napájené úseky tratě mohou být napájené různými způsoby. Podle těchto způsobů rozeznáváme tyto typy napájení:

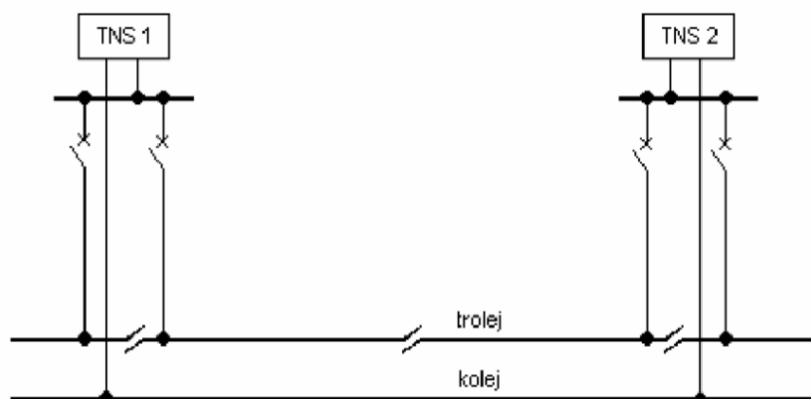
- Jednostranné napájení
- Dvoustranné napájení
- Dvoustranně rozložené napájení dvoukolejné tratě
- Čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě se spínacími stanicemi

2.5.1 Jednostranné napájení

Toto napájení lze provést jako soustředěné nebo jako rozložené. Soustředěné se provádí tak, že z jedné napájecí stanice se proud přivede kabely do několika napájecích úseků. Rozložené je provedeno naopak tak, že napájecí stanice dodává proud pouze do dvou sousedních úseků. Rozloženým napájením jsou v ČR elektrizovány v podstatě veškeré střídavé tratě. Jednostranné napájení je nejčastěji používáno u městských drah.



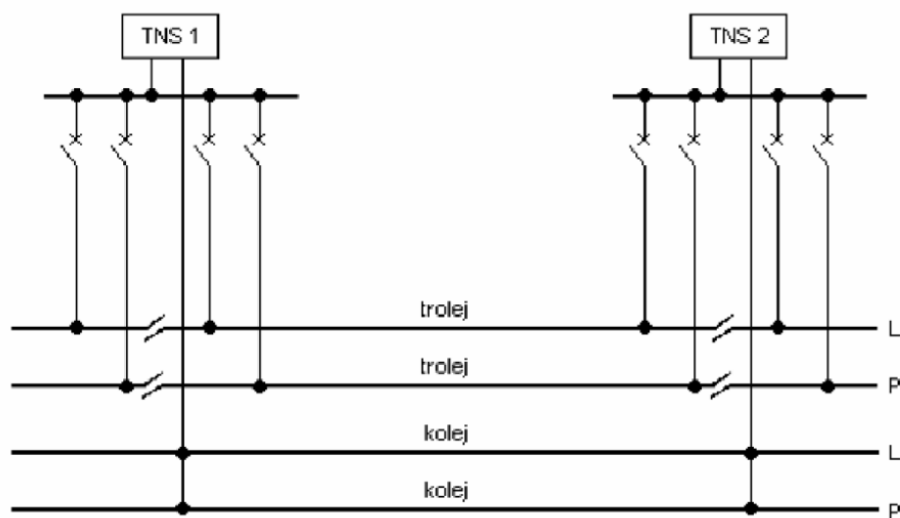
Obr.4 - Jednostranné, soustředěné napájení



Obr.5 - Jednostranné, rozložené napájení

2.5.2 Dvoustranné napájení

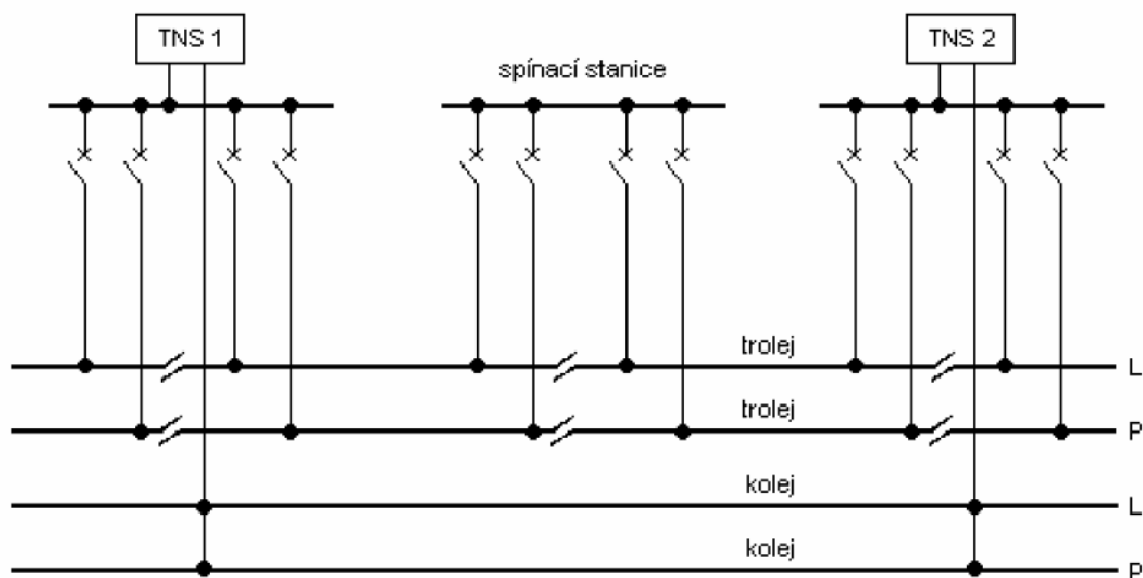
Při tomto typu napájení je napájena pravá a levá kolej odděleně. Oproti jednostrannému napájení je velkou výhodou, že je možno provést výluku jedné koleje podle potřeby, např. při opravách, poruchách či údržbě. Další výhodou je snadnější lokalizace poruch.



Obr.6 - Dvoustranné napájení

2.5.3 Čtyřstranné napájení

Tento typ napájení je možno provést na dvojkolejně trati s dvoustranně napájecími úseky. Je použit úsekový dělič a spínací stanice, která se umísťuje uprostřed úseku. Právě pomocí spínací stanice je možné vzájemně propojit všechny části trolejového vedení v úseku. Díky tomuto řešení teče při každém odběru proud čtyřmi cestami. To znamená, že se zvětší vodivý průřez a sníží se úbytky napětí. Výhodou tohoto typu napájení je, že při poruše je možno odstavit pouze polovinu napájecího úseku jedné koleje.



Obr.7 - Čtyřstranné napájení

2.6 Typy trolejového vedení

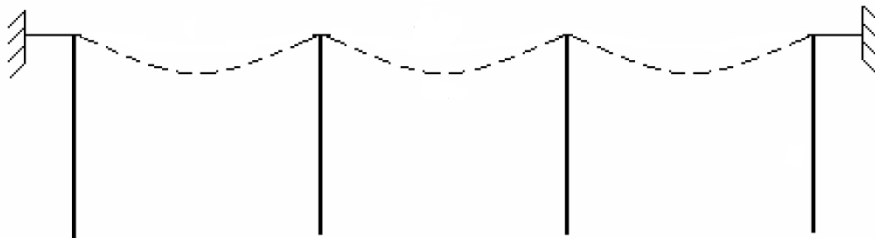
Trolejové vedení zajišťuje nepřetržitou dodávku elektrické energie do sběrače vozidla. Problémy nastávají při odskoku nebo kmitání sběrače. V důsledku těchto jevů dochází k opalování trolejového vodiče elektrickým obloukem, který vznikne mezi sběračem a vodičem. Kvůli opalování elektrickým obloukem musí být trolejový vodič veden vodorovně s určitou horizontální klikatostí a to proto, aby se plochy sběračů opotřebovaly pokud možno co nejvíce rovnoměrně. Tyto podmínky musí být splněny vždy, i při různých povětrnostních vlivech jako je např. mráz, silný vítr. Dalším důležitým faktorem je rychlost jízdy. Čím je rychlost vyšší, tím jsou nároky na trolejové vedení větší. Při velmi velkých rychlostech se požaduje, aby vedení

mělo stejnou pružnost a to po celé délce vedení. To znamená, že na celé délce vedení se nesmí nacházet žádné tvrdé body. Podle těchto požadavků a podle rychlostí jízdy jsou konstruovány různé typy trolejových vedení:

- Vedení prosté
- Vedení řetězovkové nekompenzované
- Vedení řetězovkové polokompenzované
- Vedení řetězovkové plněkompenzované

2.6.1 Vedení prosté

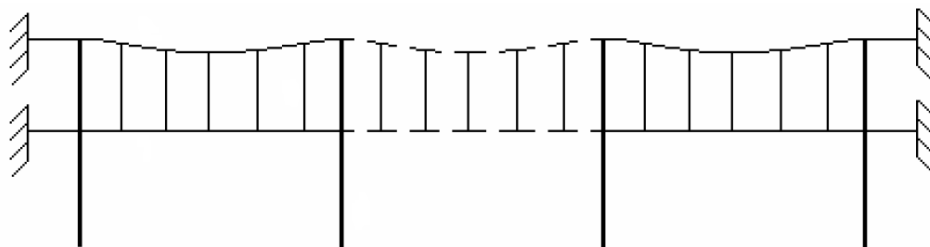
U tohoto typu vedení není použito nosné lano. Trolejový vodič se působením vlastní tíhy prohne mezi podpěrami do tvaru řetězovky. Působením povětrnostních vlivů, hlavně změnami teplot, se mění i průhyb vodiče. V létě je průhyb větší a v zimě zase menší. Tento typ trakčního vedení se používá pouze pro malé rychlosti do 70 km/h. S ohledem na tvrdé body v místě zavěšení a na proměnlivou výšku vedení se toto vedení používá minimálně. Nejčastěji je možné se s ním setkat u městské hromadné dopravy nebo na vedlejších staničních kolejích.



Obr.8 - Vedení prosté

2.6.2 Vedení řetězovkové nekompenzované

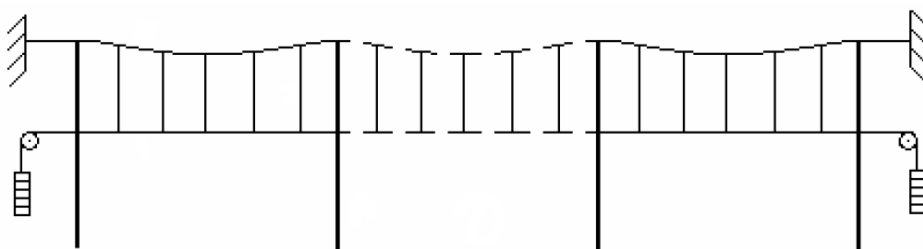
Toto vedení už obsahuje nosné lano. Trolejový vodič i nosné lano je pevně ukotveno. Vlivy teplot na průhyb trolejového vodiče je mnohem menší než u vedení prostého. Proto se tento typ trakčního vedení může používat pro větší rychlosti a to do 90 km/h.



Obr.9 - Vedení řetězovkové nekompenzované

2.6.3 Vedení řetězovkové polokompenzované

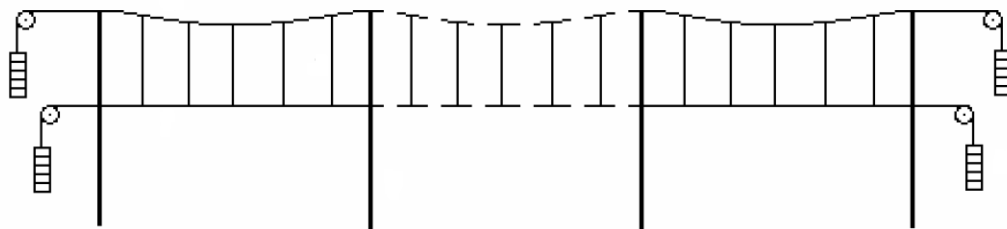
Tento typ vedení má nosné lano pevně ukotveno a trolejový vodič je napínán (kompenzován jeho průhyb) závažím. Tím pádem je možno použít tento typ trakčního vedení pro vyšší rychlosti než u vedení nekompenzovaného. Je možné ho použít do rychlosti 120 km/h. Používá se především v Rusku a na Ukrajině.



Obr.10 - Vedení řetězovkové polokompenzované

2.6.4 Vedení řetězovkové plněkompenzované

U tohoto typu vedení je samočinně napínáno závažím jak nosné lano, tak trolejový vodič. Výkyvy teplot nemají na tah vodiče žádný vliv. Toto vedení je možno použít do rychlosti 160 km/h. Často se používá u ČD.



Obr.11 - Vedení řetězovkové plněkompenzované

3 Nesymetrické zatěžování elektrizační soustavy při napájení elektrizovaných tratí

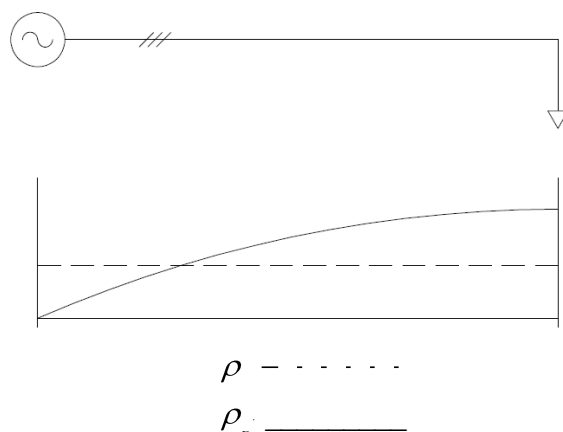
Nesymetrie v 3-fázové soustavě je nežádoucí jev. Nejčastěji vzniká připojením velké 1-fázové nebo 2-fázové zátěže do sítě. Zdroje elektrické energie jako jsou turboalternátory a hydroalternátory jsou v podstatě symetrické. Elektrické vedení je také symetrické. Z toho vyplývá, že nesymetrické jsou některé druhy zátěží jako například indukční pece nebo napájení elektrické trakce. 3-fázovou soustavu je nutné udržovat v symetrickém stavu. To znamená, že velikost fázových veličin musí být stejná, a také musí být stejný fázový posun mezi jednotlivými fázemi. Pokud není dodržena první podmínka, jedná se o nesymetrii amplitudovou. V případě, že je různý fázový posun mezi jednotlivými fázemi, jedná se o nesymetrii úhlovou. V praxi se nejčastěji jedná o nesymetrii obecnou, to je kombinace předešlých dvou případů.

V celé energetické soustavě má nesymetrie nepříznivý vliv na elektrické stroje a přístroje, které vytvářejí magnetické pole. Především na ty rotační. Už 4% napěťová nesymetrie způsobí, že asynchronní motor bude mít pouze poloviční životnost. Nesymetrie znemožňuje normální chod spotřebičů. Zvyšuje ztráty a tím i tepelné namáhání. Pokud není možné nesymetrii úplně vyloučit je nutné ji držet v určitých předepsaných mezích.

Po připojení velkých 1-fázových nebo 2-fázových zátěží vzniká nejdříve proudová nesymetrie. Až při průchodu nesymetrických proudů soustavou se vytvoří na impedancích v soustavě úbytky napětí a tím vzniká napěťová nesymetrie. Průběhy napěťové a proudové nesymetrie vzhledem na vzdálenosti od zdroje jsou rozdílné. Proudová nesymetrie je v celé délce vedení konstantní. Napěťová nesymetrie je největší u spotřebiče. Směrem ke zdroji klesá. U zdroje je prakticky rovna nule.



Obr.12 - Zjednodušené blokové schéma sítě směrem od zdroje ke spotřebiči



Obr.13 - Zobrazení proudové a napěťové nesymetrie směrem od zdroje ke spotřebiči

3.1 Složkové soustavy

Dle Fortescuovy teorie můžeme n-fázovou nesymetrickou soustavu harmonických veličin rozložit na (n-1) symetrických složkových soustav, které vytvářejí točivé magnetické pole a jednu, která jej nevytváří.

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix} \quad (4)$$

-fázory fázových napětí a fázových proudů: $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C; \underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$

-fázory složkových napětí a proudů: $\underline{U}_0, \underline{U}_1, \underline{U}_2; \underline{I}_0, \underline{I}_1, \underline{I}_2$

-operátor: $a = e^{j120^\circ}$

3.2 Klasifikace nesymetrie a nevyváženosti

V 3-fázových soustavách hodnotíme nesouměrnost součinitelem napět'ové a proudové nesymetrie:

$$\rho_u = \frac{|\underline{U}_2|}{|\underline{U}_1|} \cdot 100 \% \quad (5)$$

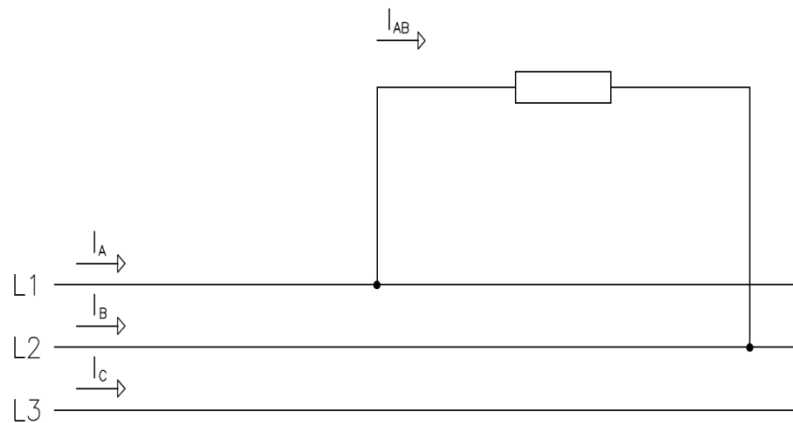
$$\rho_i = \frac{|\underline{I}_2|}{|\underline{I}_1|} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Nevyváženost se v 3-fázových soustavách hodnotí součinitelem napět'ové a proudové nevyváženosti:

$$\gamma_u = \frac{|\underline{U}_0|}{|\underline{U}_1|} \cdot 100 \% \quad (7)$$

$$\gamma_i = \frac{|\underline{I}_0|}{|\underline{I}_1|} \cdot 100 \% \quad (8)$$

3.3 Přibližný výpočet napět'ové nesymetrie při 1-fázové zátěži



Obr.14 - Připojení 1-fázové zátěže k 3-fázovému vedení

Součinitel napět'ové nesymetrie ρ_U je možné pro případ jednofázového odběru přibližně vypočítat ze zjednodušeného vztahu, který se určí takto:

$$\rho_U = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 = \frac{I_2 \cdot Z_2}{U_1} \cdot 100 \quad (9)$$

Z_2 - impedance zpětné složky v místě připojení .

Při jednofázovém odběru platí pro síťové proudy:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB}, \underline{I}_B = \underline{I}_{AB}, \underline{I}_C = 0$$

Při využití Fortescuovy teorie vypočítáme proud zpětné složky:

$$\underline{I}_2 = \frac{(\underline{I}_A + \epsilon^2 \cdot \underline{I}_B + \epsilon \cdot \underline{I}_C)}{3} = \frac{\underline{I}_{AB} \cdot (1 - \epsilon^2)}{3} \quad (10)$$

jeho absolutní hodnota je pak rovna:

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot I_{AB} = \left| 1 + \frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \frac{\epsilon}{3} I_{AB} \quad (11)$$

dosazením do rovnice dostaneme vztah:

$$\rho_{\%} = \frac{I_{AB} \cdot Z_2}{\sqrt{3} \cdot U_1} \cdot 100 \quad (12)$$

po úpravě vztahu dostaneme:

$$\rho_{\%} = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_1}{U_1} \cdot \frac{Z_2}{U_1} \cdot 100 = I_{AB} \cdot \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \frac{Z_2}{3 \cdot U_1^2} \cdot 100 \quad (13)$$

První část vztahu je rovna odebíranému jednofázovému výkonu S_{1f} . Druhou část rovnice můžeme nahradit převrácenou hodnotou třífázového zkratového výkonu S_{K3}'' , který se obecně určí:

$$S_{K3}'' = \frac{3 \cdot c \cdot U_V^2}{Z_k} = \frac{(\sqrt{3} \cdot U_1)^2}{Z_2} \quad [\text{MVA}] \quad (14)$$

Vztah jsme upravili a pro snadnější a jednodušší výpočet:

- hodnota koeficientu c se rovná 1
- vztahné napětí U_V se rovná napětí sousledné složky
- pro celkovou impedanci Z_k mezi místem připojení jednofázové zátěže a všemi zdroji v soustavě, ve které převažují turboalternátory, platí $Z_k = Z_{(1)} = Z_{(2)}$

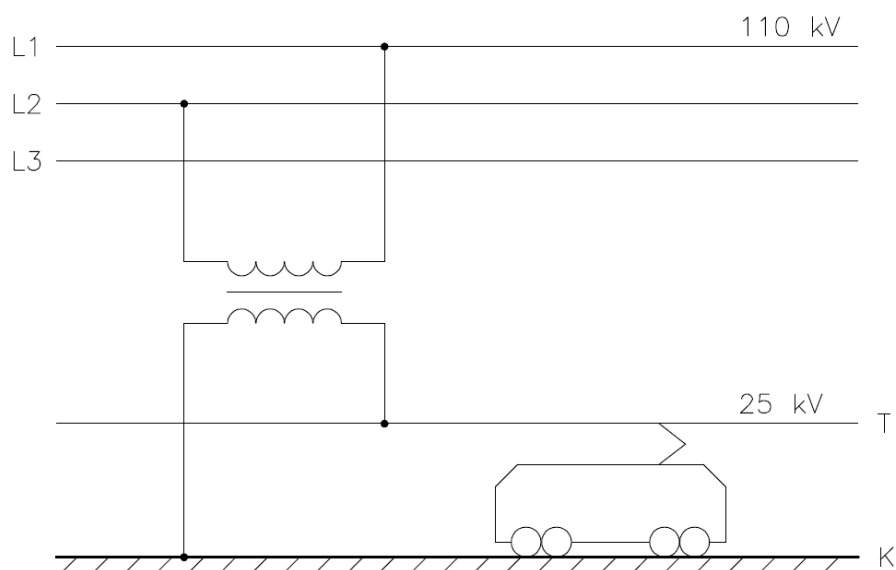
Po úpravě dostaneme ze vztahu přibližný vztah pro součinitel napět'ové nesymetrie:

$$\rho_{\%} = \frac{S_{1f}}{S_{K3}''} \cdot 100 \quad [\%] \quad (15)$$

Tímto vztahem je možno určit maximální výkon jednofázového odběru, který je možno připojit na třífázovou soustavu v určitém místě při znalosti mezní nesymetrie.

3.4 Výpočet proudové nesymetrie při připojení T transformátoru

Následkem proudové nesymetrie vznikají vyrovnávací proudy v tlumících vinutí synchronních generátorů. Tím je způsobeno zhoršené využití a navýšení ztrát v transformátorech a vedeních. Impedancemi přenosové cesty spolu s proudovou nesymetrií vytvářejí napětovou nesymetrii. Při poruchových stavech bývají hlavní příčinou proudové nesymetrie nesouměrné zkraty.



Obr.15 - Napájení trakčního vedení pomocí transformátoru T

$$\begin{aligned} I_A &= I_{AB} \\ I_B &= -I_{AB} \\ I_C &= 0 \end{aligned}$$

Obdobně jako zpětné složky proudu určíme i souslednou složku proudu při výpočtu proudové nesymetrie:

$$I_1 = \frac{I_A + \iota \cdot I_B + \iota^2 \cdot I_C}{3} = \frac{I_{AB} \cdot (1 - \iota)}{3} \quad (16)$$

$$I_2 = \frac{\underline{I}_A + \iota^2 \cdot \underline{I}_B + \iota \cdot \underline{I}_C}{3} = \frac{\underline{I}_{AB} \cdot (1 - \iota^2)}{3} \quad (17)$$

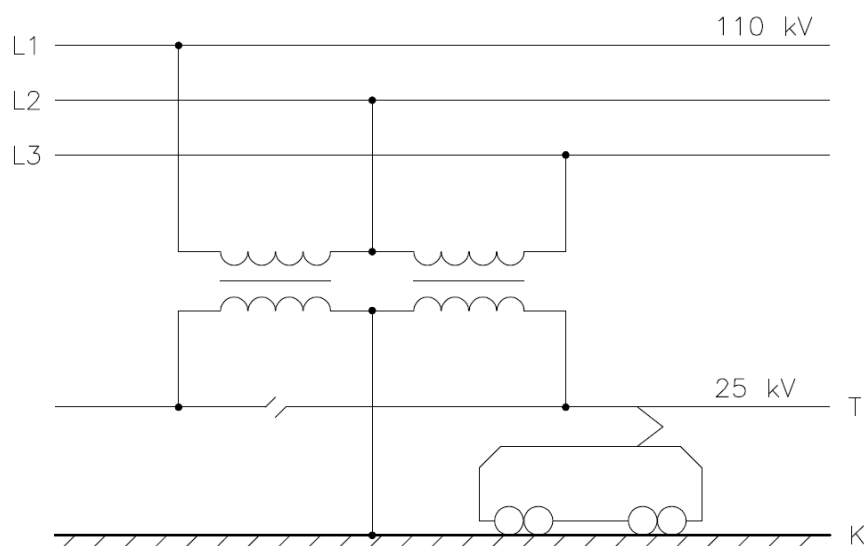
Dále můžeme z předešlých vztahů odvodit:

$$\rho = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \frac{\left| \frac{1}{3} \cdot I_{AB} \cdot (-a) \cdot (+a) \right|}{\left| \frac{1}{3} \cdot I_{AB} \cdot (-a) \right|} = \left| -a \right| = \left| -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3}{4}} =$$

(18)

Z tohoto vztahu je patrné, že jednofázová zátěž má za následek vždy 100% proudovou nesymetrii. Velikost odebíraného proudu na ní při tom nemá žádný vliv. Ze vzorce je vidět, že z ρ_1 (součinitele proudové nesymetrie) nedokážeme určit velikost ani typ jednofázového spotřebiče, který je připojen na trojfázovou soustavu. Z toho důvodu používáme při posuzování a hodnocení nesymetrie součinitel ρ_U (napěťová nesymetrie).

3.5 Výpočet proudové nesymetrie při připojení V transformátoru



Obr.16 - Napájení trakčního vedené pomocí transformátoru V

$$\begin{aligned} I_A &= I_{AB} \\ I_B &= I_{BC} - I_{AB} \\ I_C &= -I_{BC} \end{aligned}$$

Proud I_1 určíme takto:

$$I_1 = \frac{1}{3} \cdot (I_A + I_B + I_C) = \frac{1}{3} \cdot (I_{AB} + I_{BC} - I_{AB} - I_{BC}) = 0 \quad (19)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} \cdot (I_{AB} \cdot 1 + I_{BC} \cdot 1) = \frac{1}{3} \cdot (I_{AB} + I_{BC}) \quad (20)$$

Proud I_2 určíme takto:

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot (I_A + I_B + I_C) = \frac{1}{3} \cdot (I_{AB} + I_{BC} - I_{AB} - I_{BC}) = 0 \quad (21)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot (I_{AB} \cdot 1 + I_{BC} \cdot 1) = \frac{1}{3} \cdot (I_{AB} + I_{BC}) \quad (22)$$

Proudová nesymetrie vyjde potom takto:

$$\rho = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \frac{I_{AB} \cdot 1 + I_{BC} \cdot 1}{I_{AB} + I_{BC}} \quad (23)$$

Na rozdíl od jednofázové zátěže v případě dvoufázové není proudová nesymetrie vždy 100% , ale pohybuje se od 50% do 100% a to podle typu zátěže.

3.6 Kompenzace nesymetrie při provozu 1-fázové vozby

Při provozu jednofázové vozby můžeme vzniklou nesymetrii eliminovat dvěma způsoby. Jedním z nich je speciální konstrukce transformátorů, a tím druhým je pomocí kompenzačních zařízení. Nesymetrii těmito způsoby buďto pouze snížíme nebo se dá zrušit úplně.

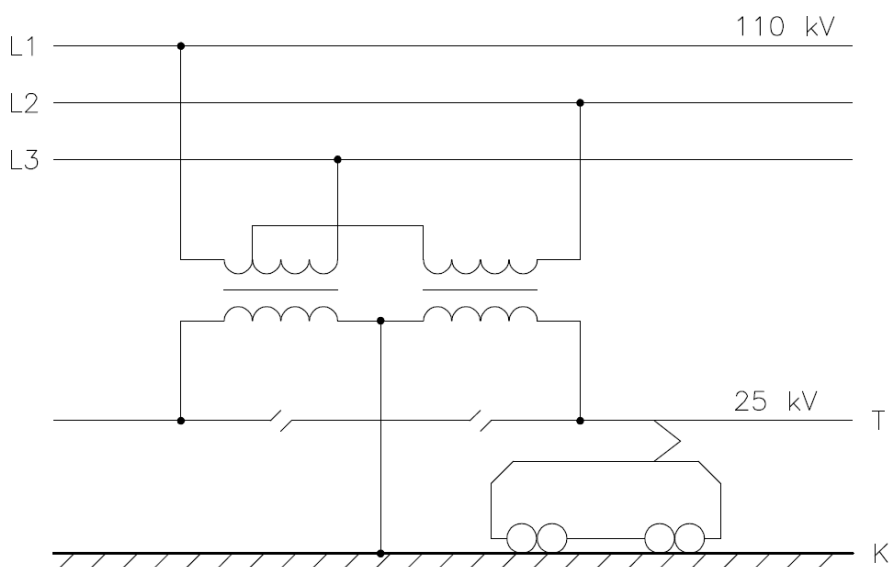
3.6.1 Scottův transformátor

Jedná se o nejrozšířenější speciální konstrukci transformátorů pro řešení nesymetrie. Je používán zejména ve Francii. Pokud jsou stejně zatížené oba napájené úseky, je hodnota proudové nesymetrie rovna nule.

Jedná se o spojení dvou jednofázových transformátorů. Sekundární napětí i výkony těchto transformátorů jsou stejné. Vzájemně od sebe oddělené úseky tratě jsou napájené každá jedním transformátorem. Tímto zapojením v podstatě měníme symetrickou trojfázovou napájecí soustavu na symetrickou dvoufázovou soustavu. Mezi těmito dvě fázemi je sdružené napětí:

$$U_{22} = 25000 \cdot 2 = 35300 \text{ V} = 35,3 \text{ kV}$$

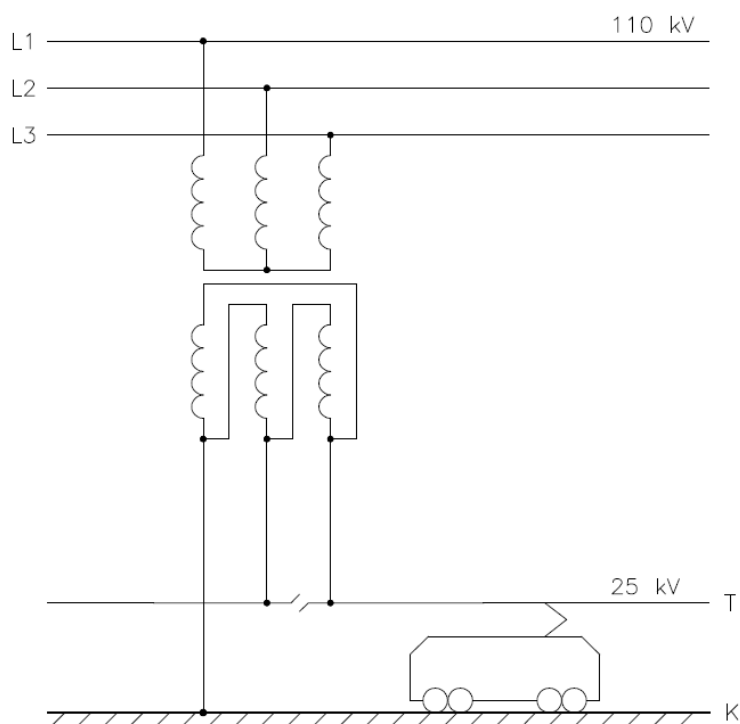
Z tohoto důvodu je potřeba při styku dvou trolejových vedení, které jsou napájeny každá z jiného transformátoru, oddělit tyto vedení neutrálním polem. Tímto opatřením se zamezí k mezifázovému zkratu při průjezdu sběrače. Pokud jsou současně zatížené obě sekundární fáze, rozdělí se součtový výkon rovnoměrně do všech tří primárních fází.



Obr.17 - Schéma Scottova transformátoru

3.6.2 Transformátor v zapojení Y/D-1, Y/D-11

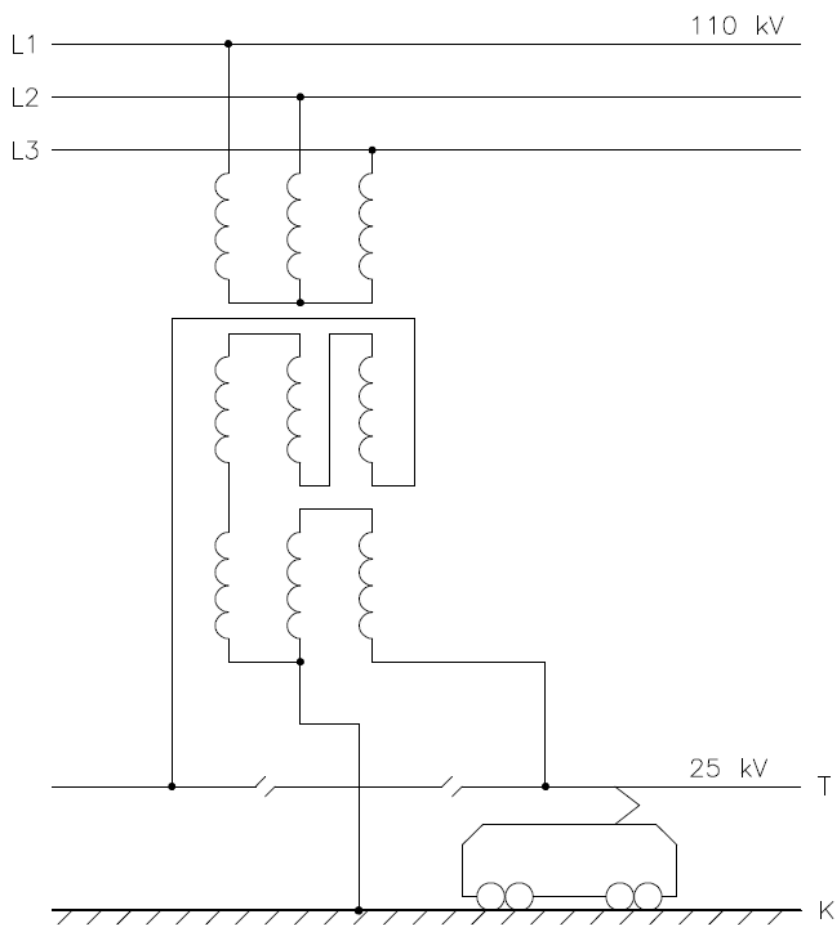
Třífázový transformátor v tomto zapojení je symetrický. Je možné používat i trojfázových transformátorů k napájení jednofázové trakční sítě z primárního trojfázového napájecího systému. Jeden vývod se připojí ke společné kolejnici a další dva se přivedou na oddělené úseky trakčního vedení.



Obr.18 - Schéma transformátoru zapojeného Y/D-1, Y/D-11

3.6.3 Leblancův transformátor

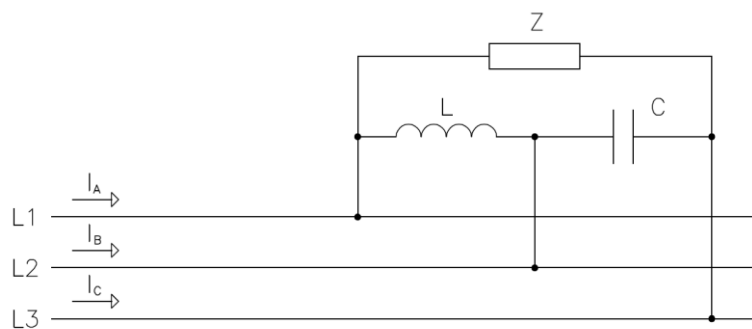
Je to jeden z dalších způsobů jak snížit nesymetrii kterou způsobuje jednofázová zátěž. Tento způsob zapojení se používá především v nástupnických zemích SSSR. Na schématu je vidět, že je třeba také oddělit jednotlivá trakční vedení oddělovacím polem pro zamezení mezifázového zkratu.



Obr. 19 - Schéma Leblancova transformátoru

3.6.4 Statické filtry

Tímto způsobem se snižuje nesymetrie především u zátěží, které jsou proměnné v čase. Využívá se přitom LC filtrace.

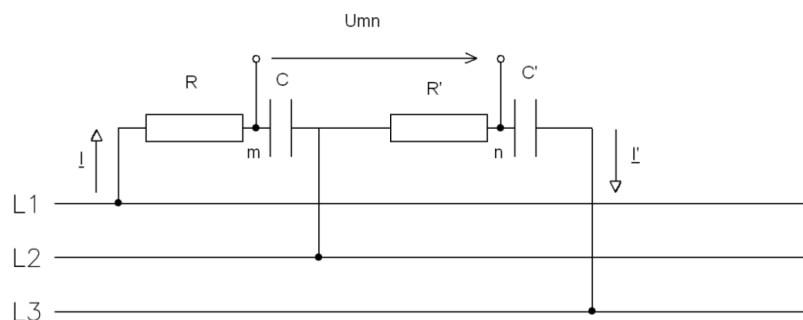


Obr.20 - Schéma L-C článku

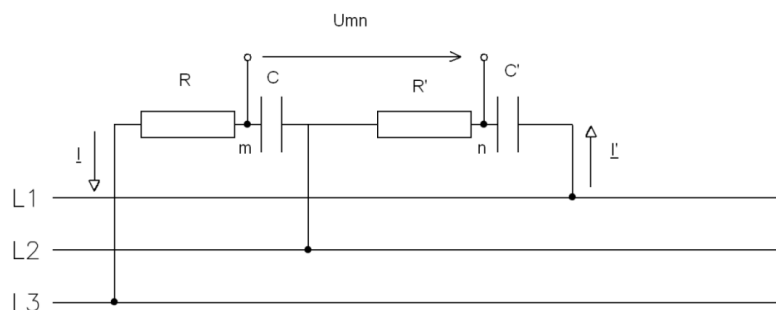
3.7 Měření napět'ové nesymetrie

3.7.1 Měření statickými filtry

Pokud vytvoříme vhodnou kombinaci R , L , C prvků filtry, můžeme jejich pomocí změřit souslednou a zpětnou složku harmonického napětí.



Obr.21 - Schéma statického filtru pro měření napětí sousledné soustavy



Obr.22 - Schéma statického filtru pro měření napětí zpětné soustavy

Ze schémat je vidět, že zapojení jsou velice podobná. Jediná věc, která se mění je zapojení pořadí fází ke vstupním svorkám. V první větvi musí být prvky R, C voleny tak, aby proud byl posunut proti napětí o 60° a v druhé větvi musí být prvky R', C' voleny tak, aby proud v této větvi byl posunut proti napětí o 30° .

3.7.2 Měření rotačními filtry

Další možnost jak měřit zpětné složky napětí je použitím rotačních filtrů. Toto zařízení je dražší a složitější než statické filtry. Skládá se ze synchronního motoru, který je zároveň

hnací stroj a z asynchronního motoru, který je poháněn hnacím strojem. Oba stroje jsou vzájemně spojeny mechanicky i elektricky. To znamená, že rotory těchto strojů jsou spojené a statory jsou připojené na měřenou síť. Při takovém zapojení se asynchronní motor točí synchronními otáčkami a do jeho rotoru se nic neindukuje. To znamená, že soustava je symetrická. Pokud se do jeho rotoru začne indukovat napětí, je to známka nesymetrie v soustavě, na kterou jsou motory připojeny.

3.7.3 Měření na základě přímé aplikace Fortescueovy metody s využitím virtuální instrumentace

Předešlé dvě metody jsou poměrně složité a mají další nevýhody. Například nemožnost kombinovat měření sdružených a fázových napětí. Použitím virtuální instrumentace se všechny tyto nevýhody odstraňují. Zařízení je založeno na počítačovém měření a zpracovávání dat v reálném čase. Hodnoty z měření jsou dále ukládány na disk s možností dalšího vhodného zpracování.

4 Měření na vybrané transformovně

Trakční transformovna Svitavy se nachází na trati Česká Třebová – Brno. Jde o trakční proudovou soustavu 25 kV, 50 Hz. Tato trakční transformovna je řešená jako transformátorová stanice 110/27 kV, 50 Hz s jednofázovými napáječi. Trakční transformovna je zvláštní v tom, že se nachází na styku stejnosměrné trakce 3 kV a střídavé trakce 25 kV, 50 Hz. Transformátor T1 01 transformuje napětí 110 kV na 27 kV a napájí střídavou část trati směrem na Brno. Tento úsek je dlouhý 25 km a od stejnosměrné trati je oddělen neutrálním úsekem trati. Transformátor T1 02 transformuje rovněž 110 kV na 22 kV, 50 Hz, a toto transformované napětí je z trakční transformovny odváděno ve všech třech fázích 7 km dlouhým vedením směrem do Opatova. V Opatově se nachází trakční měnírna, která dále převádí střídavé napětí 22 kV, 50 Hz na 3 kV stejnosměrných. Tato trakční měnírna napájí část tratě směrem na Českou Třebovou.



Obr.23 - Trakční transformovna Svitavy

Technologické vybavení trakční transformovny je umístěno v novém zděném objektu. Pouze kompenzační zařízení je umístěno venku vedle budovy. Pro rozvodnu 110 kV byla použita rozvodna od německé firmy ABB. Jedná se o zapouzďřenou rozvodnu s izolací SF6. Tato rozvodna je umístěna v prvním patře objektu a jedná se o vnitřní rozvodnu. Tuto rozvodnu tvoří dvě odbočky na venkovní vedení 110 kV, podélná spojka přípojníc a dvě odbočky na transformátory T1 01 a T1 02. Jmenovitý proud této rozvodny je 1250 A. Jmenovitý zkratový

proud je potom 25 kA a to při jmenovitém kmitočtu 50 Hz. Jmenovitý tlak plynu je 700 kPa a minimální tlak plynu je 600 kPa.

Trakční transformátor T1 01 je na straně 110 kV připojen na sdružené napětí. Sekundární strana 27 kV má přes rozvodnu 27 kV jeden pól. Rozvodna 27 kV je umístěna v přízemí budovy trakční transformovny a je řešená jako kobková. Je pouze s jednou podélně dělenou přípojnící. Tento trakční transformátor má své filtračně-kompenzační zařízení, které je umístěno pod přístřeškem podél budovy trakční transformovny.

V trakční transformovně Svitavy je vlastní spotřeba zajištěna přes rozvodnu 22 kV a přes transformátor vlastní spotřeby 22/0,4 kV. Pro zajištění stejnosměrné spotřeby jsou v trakční transformovně baterie 24 V a 110 V.



Obr.24 – Rozvodna 110 kV

Filtračně-kompenzační zařízení má dvě kompenzační větve pro třetí a pátou harmonickou. Filtry jsou navrženy na jmenovité napětí rozvodny 27 kV.

Ovládání trakční transformovny je možno buďto ručně přímo ze stanice, nebo dálkově z kontrolního stanoviště.

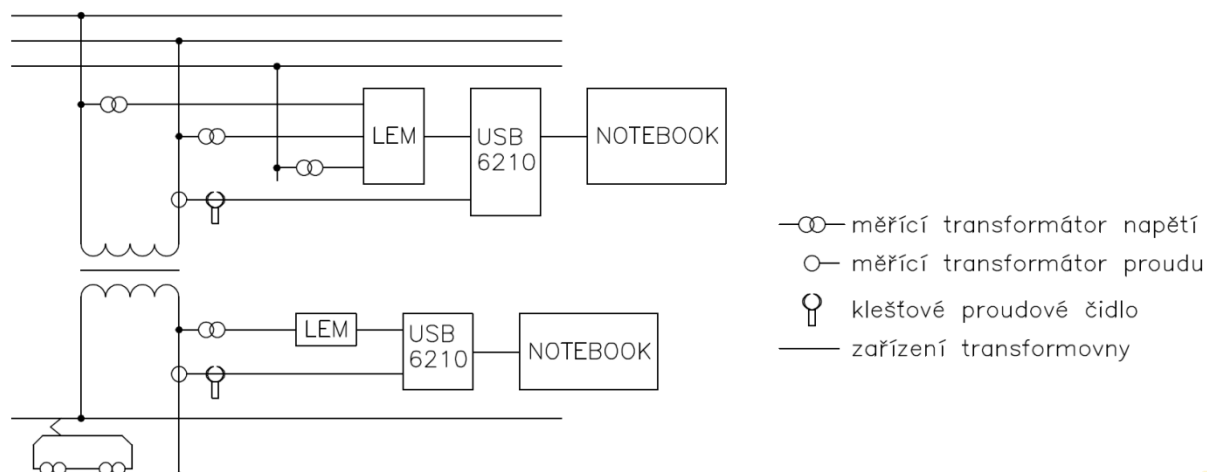
Měření bylo prováděno v trakční transformovně Svitavy od 11:00 ve středu 2.3.2011 až do 10:38 v pátek 4.3.2011. V rozvodně 110 kV jsme měřili jeden proud a 3 napětí. A jeden proud a jedno napětí na straně 27 kV. Pro připojení měřicí aparatury jsme použili měřicí transformátory proudu a napětí, které jsou přímo v trakční transformovně. Měřicí aparatura byla do obvodu měřících transformátorů připojena pomocí klešťových čidel, tím pádem nebylo nutno z důvodů měření přerušit obvod. Vzhledem k tomu, že použitá měřicí aparatura není kalibrovaná, můžeme považovat výsledky pouze za informativní. Měřicí aparatura byla nastavena tak, aby vyhodnocovala a ukládala pětisekundové průměry měřených veličin.

4.1 Měřicí aparatura a její připojení v trakční transformovně



Obr.26 - Měřicí aparatura na straně 110kV

Základem měřicí aparatury je notebook. Pro měření byl použitý měřicí převodník je USB 6210 fy National Instruments se vstupní impedancí 100 G Ω /100pF, s maximální vzorkovací frekvencí 250 kS/s (1 250 000 vzorků za sekundu) při měření na jednom kanále. Pokud měříme na více kanálech, tak se musí tato hodnota podělit počtem těchto kanálů. Celkem je tento převodník vybaven 16 měřícími kanály. Tento analogově-digitální převodník má rozlišení 16 bitů, přičemž nejvyšší bit (paritní) představuje znaménko. Vstupní rozsah je možné nastavit na hodnoty ± 50 mV až ± 10 V. Napětí a proud jsou snímány čidly LEM a klešťovými ampérmetry.



Obr.27 - Blokové schéma měřící aparatury

Přesnost použitých měřicích přístrojů a čidel:

- Měřicích transformátory MTP i MTN, které jsou instalovány v trakční transformovně, mají stejnou třídu přesnosti 0,5.
- Chyba napěťových LEM čidel LV 25 – P, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí ± 15 V, je 0,8 % (tyto podmínky jsou v TT splněny).
- Chyba proudových LEM čidel LA 25 – NP, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí ± 15 V, je 0,5 %.
- Chyba proudových LEM čidel LA 55 – P, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí ± 15 V, je 0,65 %.
- Chyba klešťových ampérmetrů E3N od firmy Chauvin Arnoux s šířkou pásma 0 – 100 kHz a rozsahy 10 a 100 A je 3 a 4 %.
- Chyba měřicí karty je pro aplikace „Accuracy Calculator“ uvedena na webových stránkách výrobce pro oba použité rozsahy. Pro rozsah karty $\pm 2,5$ V je to $\pm 4,5680$ mV, tj. $\pm 0,2284$ % pro rozsah ± 1 V je to $\pm 1,9770$ mV, tj. $\pm 0,1977$ %.

Celková chyba při měření střídavého napětí je:

$$\delta_{\text{U}} = 1,5 + 1,8 + 1,23 = 2,53\%$$

Celková chyba při měření střídavého proudu LEM čidlem LA 25 – NP:

$$\delta_{\text{I-LEM}} = 1,5 + 1,5 + 1,23 = 2,23\%$$

Celková chyba při měření střídavého proudu klešťovým ampérmetrem:

$$\delta_{\text{I-klešť}} = 1,5 + 1 + 1,2 = 2,7\%$$

Popis měřícího programu:

Program pro měření elektrických veličin v trakční transformovně byl vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW 6.1 od firmy National Instruments. Využívanou programovou aplikací je kontinuální záznam diagnostikovaných veličin, který umožňuje efektivně volit různé off-line diagnostické metody při postprocessingu naměřených dat.

4.2 Měřené veličiny

Na straně 110 kV:

- Harmonické složky napětí všech tří fází od 1 do 40
- Harmonické složky proudu od 1 do 40
- Efektivní hodnoty napětí pro všechny tři fáze
- Efektivní hodnota proudu
- Činný výkon
- $\cos(\varphi)$
- Součinitel napět'ové nesymetrie ρ
- Činitel harmonického zkreslení THD pro všechny tři napětí a proud

Na straně 27 kV:

- Harmonické složky napětí od 1 do 40
- Harmonické složky proudu od 1 do 40
- Efektivní hodnoty napětí
- Efektivní hodnota proudu
- Činný výkon
- $\cos(\varphi)$
- Součinitel napět'ové nesymetrie ρ
- Činitel harmonického zkreslení THD pro napětí a proud
- Proud naprázdno I_1 a I_2

4.3 Výsledky měření

Měření bylo vyhodnoceno programem Excel 2007, který vygeneroval grafy z veličin naměřených na rozvodně 110 kV. Vzhledem k množství naměřených hodnot a s ohledem na přehlednost grafů jsou použity pouze hodnoty ze čtvrtku 3.3.2011, a to nejprve z celých 24 hodin a následně jsou vybrány hodnoty ze čtyřhodinových úseků v časech mezi 14:00 až 18:00 a 6:00 až 10:00. V těchto časech byl poměrně velký odběr elektrické energie z napájecí soustavy. Z těchto hodnot byly vygenerovány následující grafy:

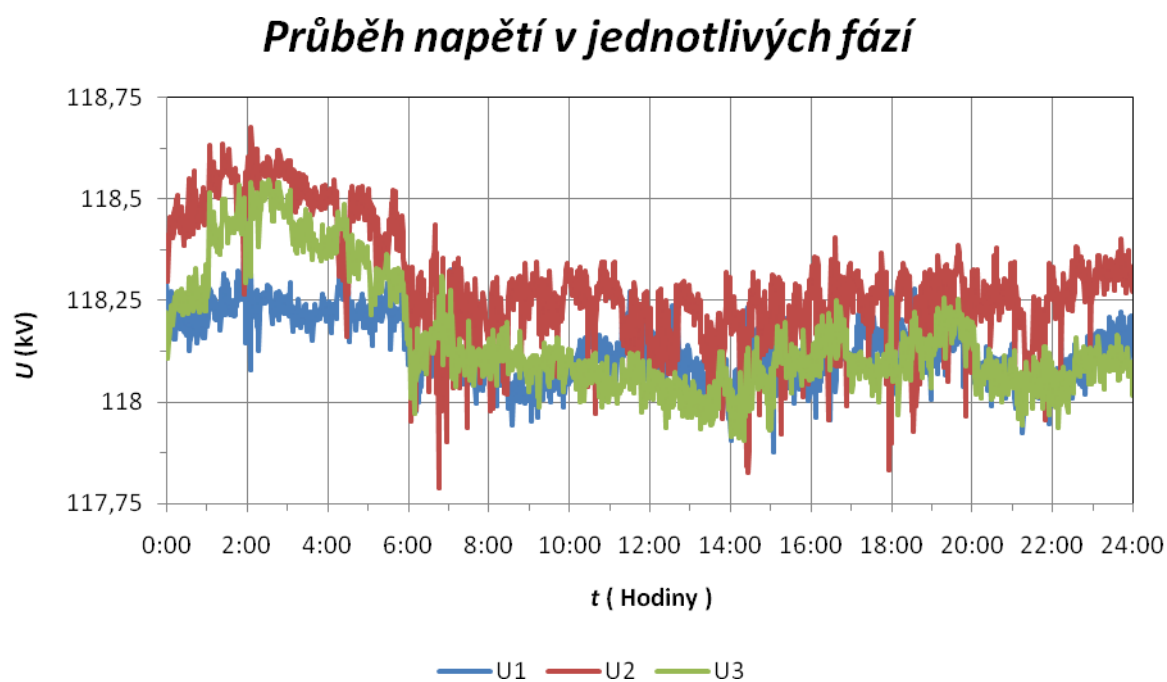
- Průběh napětí všech tří fází z 3.3.2011
- Průběh napětí všech tří fází od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011
- Průběh napětí všech tří fází od 6:00 do 10:00 z 3.3.2011
- Průběh proudu z 3.3.2011
- Průběh proudu od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011
- Průběh proudu od 6:00 do 10:00 z 3.3.2011
- Součinitel napět'ové nesymetrie z 3.3.2011
- Součinitel napět'ové nesymetrie od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011
- Součinitel napět'ové nesymetrie od 6:00 do 10:00 z 3.3.2011
- Srovnání podobnosti grafu napět'ové nesymetrie a výkonu z 3.3.2011
- Srovnání podobnosti grafu napět'ové nesymetrie a výkonu od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011
- Srovnání podobnosti grafu napět'ové nesymetrie a výkonu od 6:00 do 10:00 z 3.3.2011

4.3.1 Průběhy napětí

Z grafu průběhu napětí všech tří fází z 3.3.2011 jde vidět, že hodnoty napětí jsou vyšší v době mezi časy 0:00 až 4:00. To je zřejmě způsobeno velmi nízkou úrovní dopravy v této době. Ve zbytku dne, kdy narůstá frekvence dopravy na měřeném úseku, je viditelný pokles napětí.

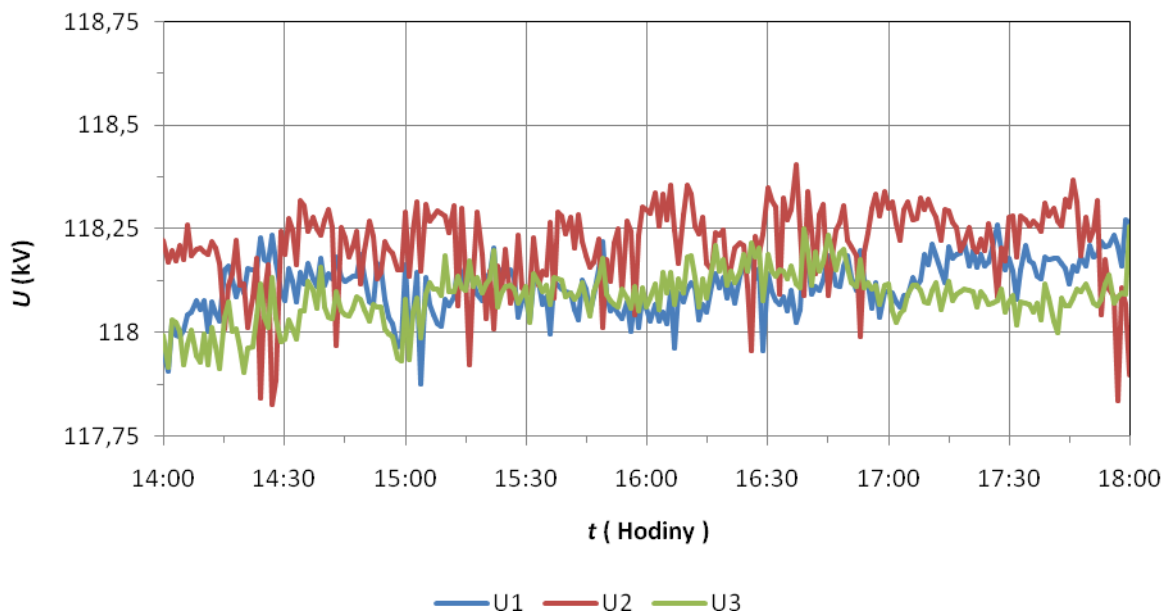
Podle normy ČSN EN 50160 musí být charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z distribuční sítě v určité toleranci. Pro napájecí napětí v sítích VN s hodnotou 110 kV to je $\pm 10\%$.

Naměřené hodnoty na rozvodně 110 kV zcela odpovídají normě. Ani při zvýšeném zatížení nebo naopak při nízké frekvenci dopravy v nočních hodinách nebyly výkyvy napětí mimo předepsanou mez. Největší naměřená hodnota napětí na primární straně trakčního transformátoru byla 118,675 kV. Nejmenší hodnota byla naopak 117,789 kV .



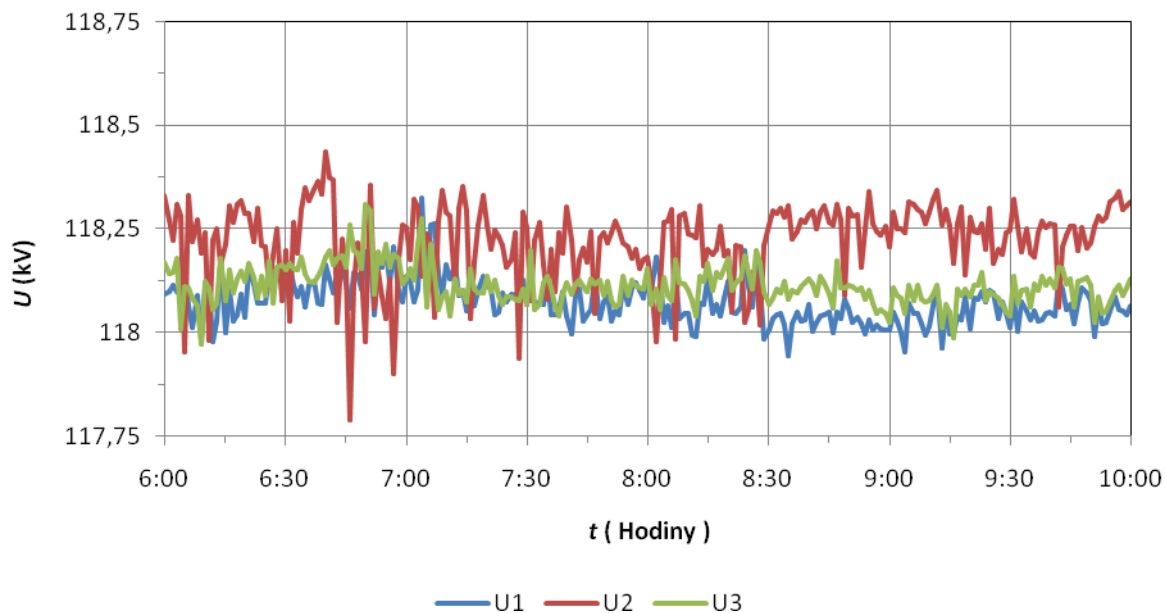
Obr.28.- Průběh napětí všech tří fází z 3.3.2011

Průběh napětí v jednotlivých od 14:00 do 18:00



Obr.29 - Průběh napětí všech tří fází od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011

Průběh napětí v jednotlivých od 6:00 do 10:00



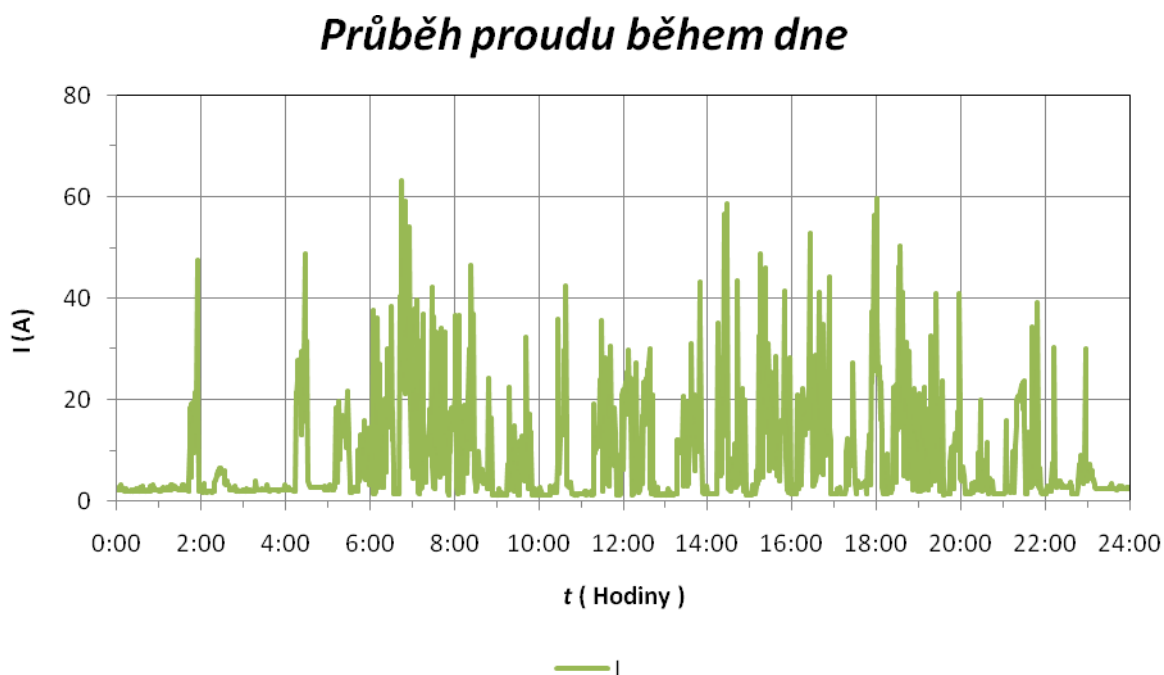
Obr.30 - Průběh napětí všech tří fází od 6:00 do 10:00 z 3.3.2011

4.3.2 Průběhy proudu

Z grafu průběhu proudu z 3.3.2011 je zřetelně vidět hustota dopravy během dne, nejnižší úroveň je v časech 0:00 až 4:00. V tomto časovém úseku je patrné pouze jedno větší zatížení, které se blíží k 60 A. Potom začne zatížení na tomto úseku tratě narůstat.

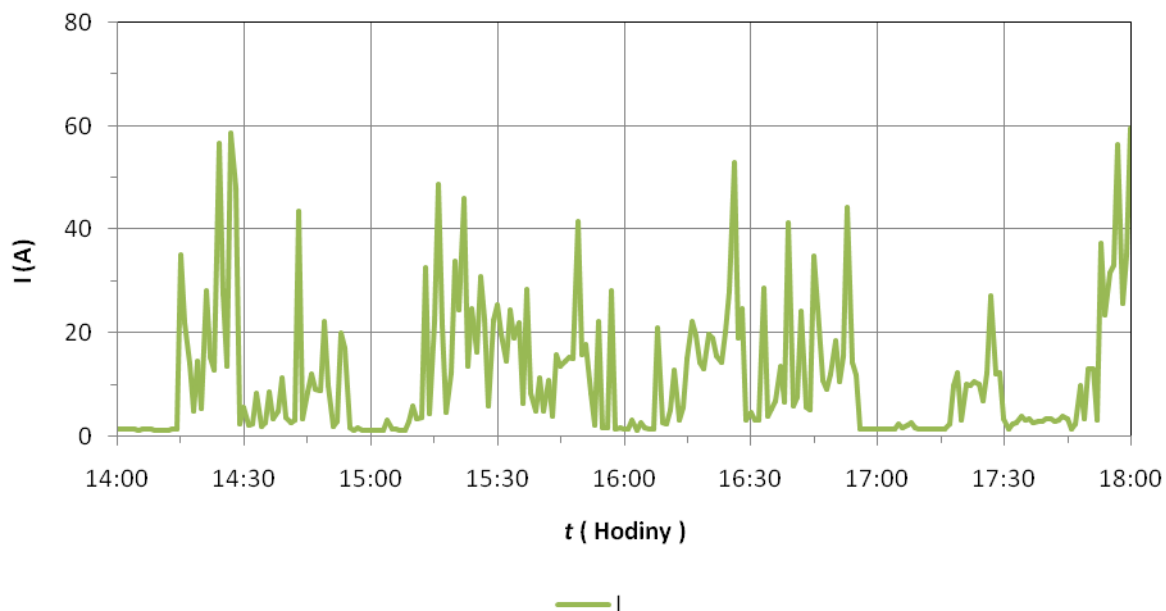
V časech 6:00 až 10:00 je patrná velmi velká hustota dopravy. Proudů naměřených na primární straně trakčního transformátoru v tomto časovém úseku v podstatě neklesají pod 30 A, spíše se pohybují mezi 40 až 60 A. V jednom případě dokonce překračují hodnotu 60A.

Během poledne potom intenzita dopravy opět mírně klesá a maximální hodnoty proudu se pohybují kolem 40 A. Další špička s velkými odběry je z grafu patrná mezi 14:00 až 18:00. Tento úsek je vybrán i pro detailnější zobrazení odběrů při velké hustotě dopravy. Maximální hodnoty proudu se v tomto časovém úseku opět pohybují mezi 40 až 60 A. V pozdějších večerních hodinách už hustota dopravy a sní i velikost naměřených proudů klesá. Celkově jsou velikosti naměřených proudů poměrně nízké.



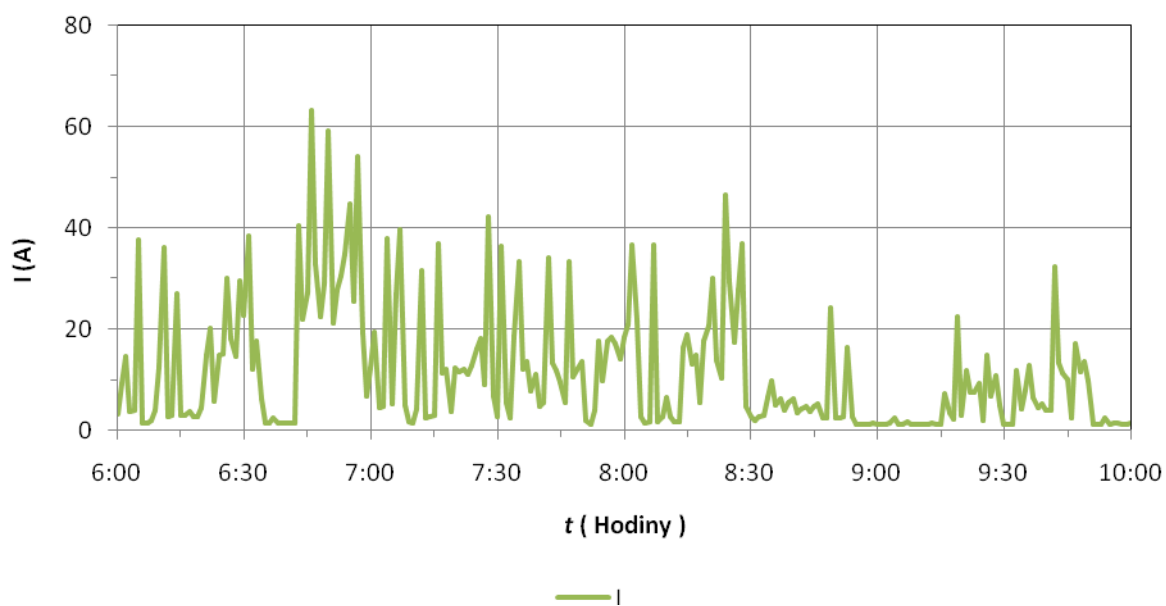
Obr.31 - Průběh proudu z 3.3.2011

Průběh proudu od 14:00 do 18:00



Obr.32 - Průběh proudu od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011

Průběh proudu od 6:00 do 10:00

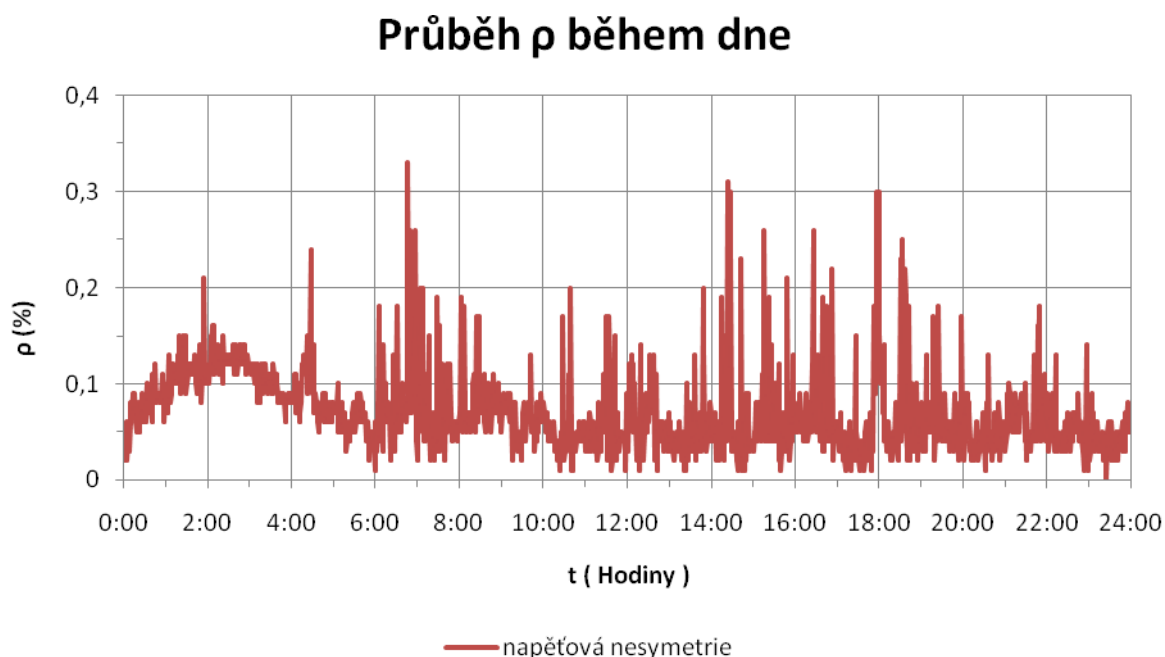


Obr.33 - Průběh proudu od 6:00 do 10:00 z 3.3.2011

4.3.3 Průběhy součinitele napěťové nesymetrie

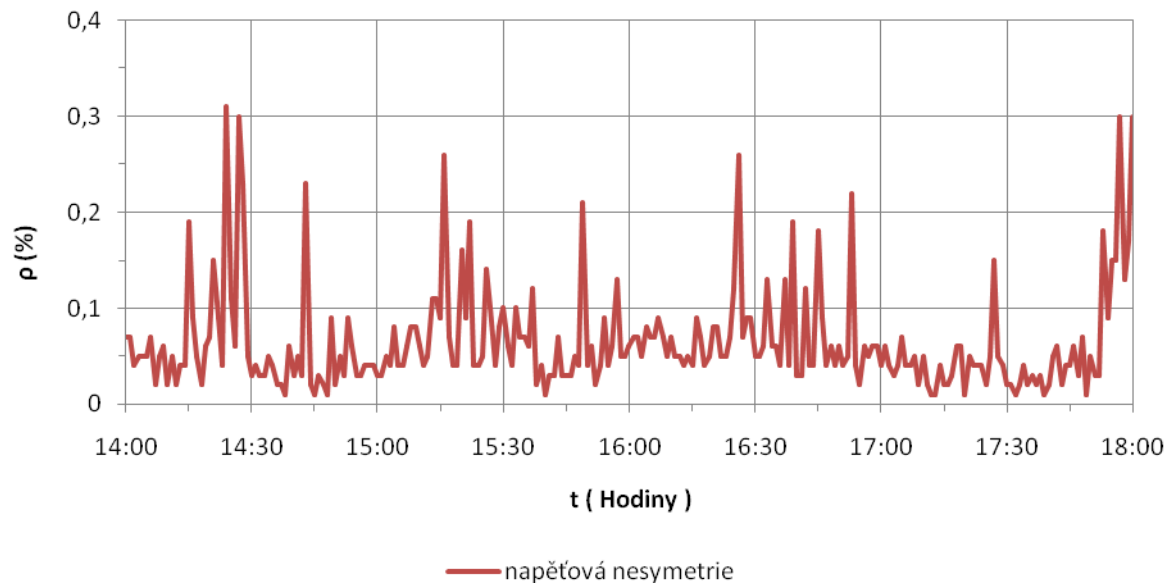
Z grafu průběhu součinitele napěťové nesymetrie během celého dne 3.3.2011 můžeme vidět, jakých hodnot napěťová nesymetrie dosahuje. Norma ČSN EN 50 160 předepisuje maximální možnou hodnotu napěťové nesymetrie 2% . Po překročení této hodnoty má napěťová nesymetrie nepříznivé účiny na distribuční síť a hlavně na spotřebiče. Jedná se především o spotřebiče využívající ke své funkci točivé magnetické pole.

Z grafu je patrné, že hodnoty součinitele napěťové nesymetrie jsou na měřeném úseku tratě velmi dobré. Nikde nepřesahují hodnotu 0,35% . Z tohoto výsledku můžeme usuzovat, že síť na měřeném úseku je velice kvalitní. Pro detailnější zobrazení součinitele napěťové nesymetrie slouží graf součinitel napěťové nesymetrie od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011 a graf součinitele napěťové nesymetrie od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011. V těchto grafech je možné vidět, jak se nesymetrie měnila při větší hustotě dopravy. V těchto dvou vybraných intervalech dosahovala nesymetrie největších hodnot. Zřejmě z důvodů největšího zatížení v těchto časech.



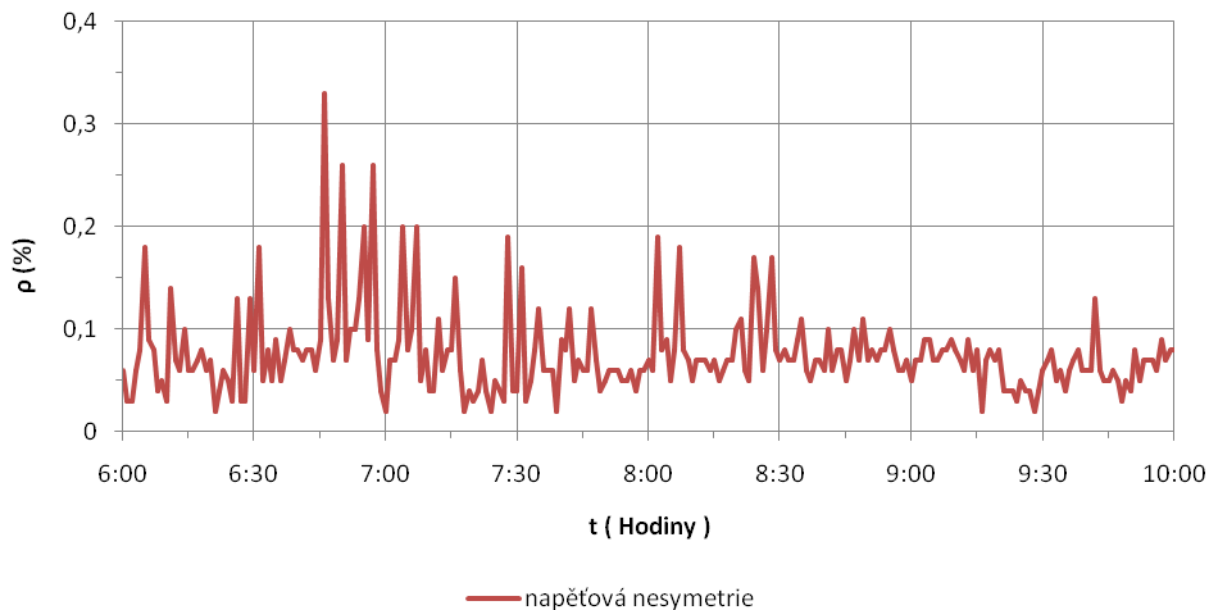
Obr.34 - Součinitel napěťové nesymetrie z 3.3.2011

Průběh ρ v intervalu od 14:00 do 18:00



Obr.35 - Součinitel napěťové nesymetrie od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011

Průběh ρ v intervalu od 6:00 do 10:00



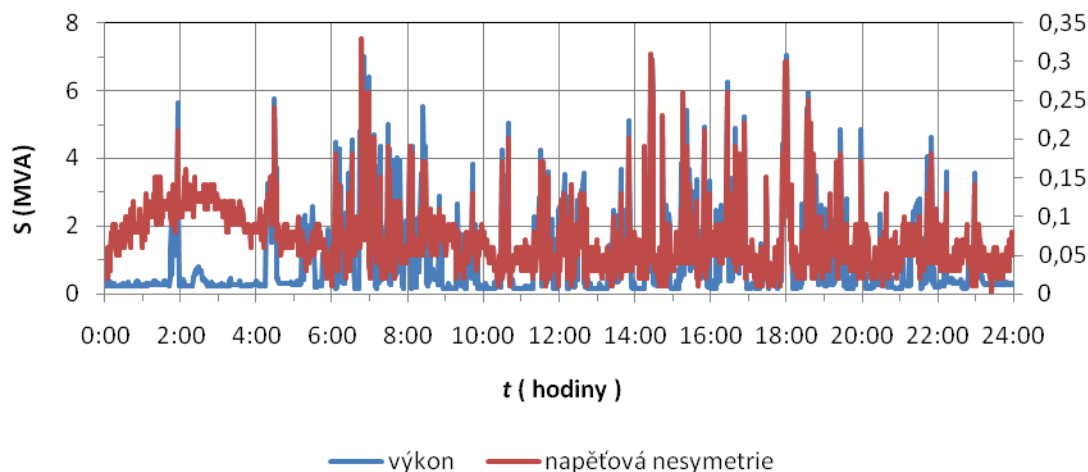
Obr.36 - Součinitel napěťové nesymetrie od 6:00 do 10:00 z 3.3.2011

4.3.4 Srovnání podobnosti grafu napěťové nesymetrie a výkonu

Z průběhu grafu závislosti napěťové nesymetrie a výkonu je vidět, že pokud se zvětší výkon, zvětší se také napěťová nesymetrie. Závislost není přímá. Je vidět, že například v brzkých ranních hodinách nesymetrie stoupá, i když výkon až na jeden případ dosahuje nulových hodnot. Pro podrobnější zobrazení této závislosti je použito opět dvou grafů, které zobrazují nesymetrii v intervalech, kdy byly hodnoty výkonu na svém maximu.

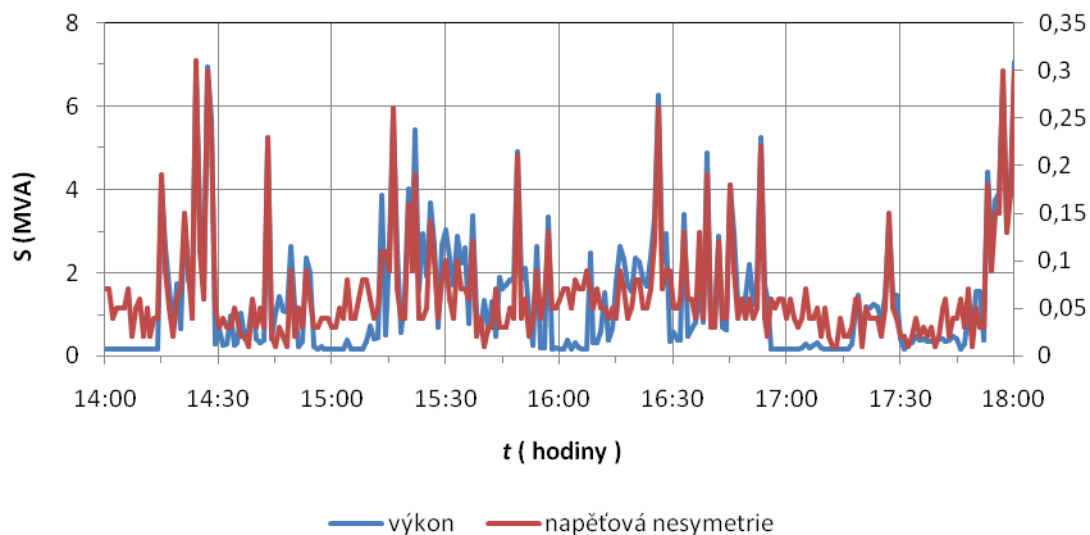
Tyto intervaly jsou od 6:00 do 10:00 a od 14:00 do 18:00. Jak je vidět na těchto grafech, kde je podrobnější zobrazení, nesymetrie je na výkonu opravdu závislá. Při zvětšené hustotě dopravy je patrný nárůst hodnoty napěťové nesymetrie. Nárůst to ale není nijak významný. Hodnoty zůstávají daleko pod 2% hranicí, kterou předepisuje norma ČSN EN 50 160. Pro posouzení do jaké míry jsou na sebe napěťová nesymetrie a odebíraný výkon závislé poslouží funkce programu Excel 2007 korelace.

Průběh výkonu a napěťové nesymetrie během dne



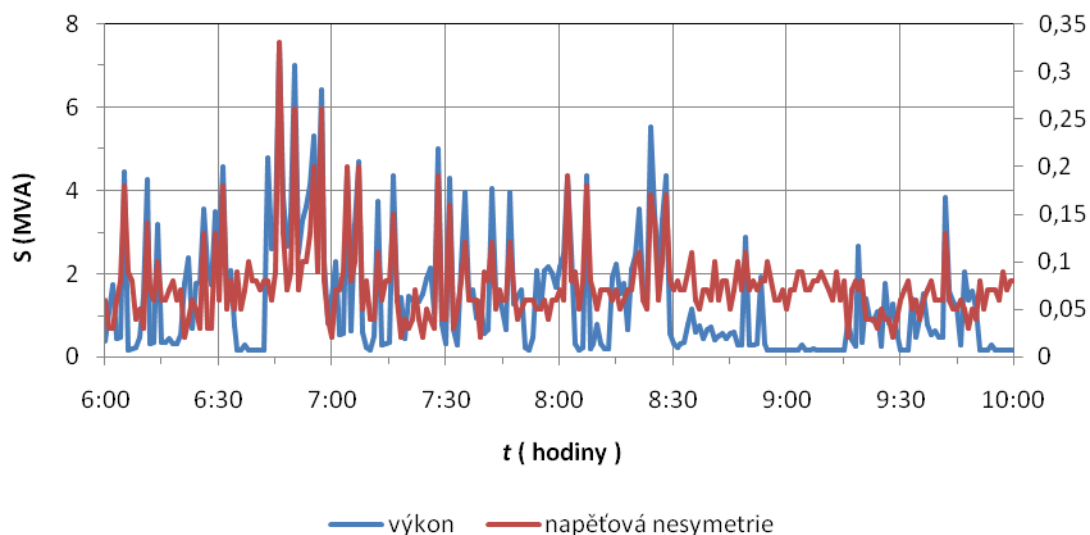
Obr.37 - Srovnání podobnosti grafu napěťové nesymetrie a výkonu z 3.3.2011

Průběh výkonu a napěťové nesymetrie od 14:00 do 18:00



Obr. 38 - Srovnání podobnosti grafu napěťové nesymetrie a výkonu od 14:00 do 18:00 z 3.3.2011

Průběh výkonu a napěťové nesymetrie od 6:00 do 10:00



Obr.39 - Srovnání podobnosti grafu napěťové nesymetrie a výkonu od 6:00 do 10:00 z 3.3.2011

4.3.5 Korelace

Korelace je vzájemný vztah mezi dvěma procesy nebo veličinami. Jestliže se jedna z nich mění, mění se korelativně i druhá. To samé platí také naopak. Pokud se mezi dvěma procesy nebo veličinami ukáže korelace, je velmi pravděpodobné, že jsou na sobě závislé, nelze z toho však usoudit, že by jeden z nich musel být příčinou a druhý následkem. To pouze samotná korelace neumožňuje rozeznat. V určitějším slova smyslu se pojem korelace užívá ve statistice, kde znamená vzájemný lineární vztah mezi znaky či veličinami x a y . Míru korelace pak vyjadřuje korelační koeficient, který může nabývat hodnot od -1 až po $+1$.

Při hodnotě 0 se obě veličiny nebo procesy neovlivňují vůbec. Pokud se hodnoty blíží k číslu 1 je mezi oběma procesy nebo veličinami přímá úměra. Při čísle -1 se jedná o nepřímou úměru.

V tomto případě je první veličina odebíraný výkon naměřený na primární straně trakčního transformátoru. Druhá veličina je součinitel napěťové nesymetrie. Výsledná korelace je spočítána programem Excel 2007 a její hodnoty jsou následující:

- Korelace pro celých 24 hodin ze dne 3.3.2011 dosahuje hodnoty 0,594
- Korelace pro časový interval od 14:00 do 18:00 ze dne 3.3.2011 dosahuje hodnoty 0,822
- Korelace pro časový interval od 6:00 do 10:00 ze dne 3.3.2011 dosahuje hodnoty 0,695

Z uvedených hodnot je patrné, že existuje určitá závislost mezi napěťovou nesymetrií a odebíraným výkonem. Nejhorší hodnoty dosáhla korelace v průběhu celých 24 hodin. To je způsobeno pravděpodobně tím, že hodnoty nesymetrie nedosahují žádných vysokých hodnot. V podstatě napěťová nesymetrie nepřekročí hodnotu 0,35%, což je velice nízká hodnota. Z toho důvodu je nutné uvažovat, že při nízkých hodnotách výkonu byla napěťová nesymetrie tak nízká, že se projevila větší chyba měření i tak malých hodnot. Na intervalu celých 24 hodin je mnoho časových úseků, na kterých jsou velmi nízké hodnoty výkonu. To má za následek o něco horší výsledek korelace než u vybraných krátkých časových úseků, kde byly větší odběry výkonu.

V časovém intervalu od 14:00 do 18:00 vychází korelace naopak nejlépe. To je způsobeno tím, že v celém tomto čtyřhodinovém úseku je stále velký výkon. Tím pádem se i závislost napěťové nesymetrie na výkonu projevila mnohem více než při celodenním časovém intervalu.

Stejná situace je také v časovém intervalu od 6:00 do 10:00. Jedná se také o časový interval, ve kterém je velká hustota dopravy a tím pádem také velké odebírané výkony.

5 Závěr

Tato práce měla za cíl zabývat se problematikou nesymetrie při provozu jednofázové vozby. Nesymetrie je hlavní nevýhodou při provozu střídavé trakce. Napájecí soustava 25 kV, 50 Hz je jednou z hlavních příčin vzniku napěťové nesymetrie trakční napájecí soustavy. Napěťová nesymetrie je přímou vzdáleností napájecích stanic. Její velikost je tedy možno snížit zmenšením vzdálenosti napájecích stanic. Další možností jak snížit napěťovou nesymetrii je pomocí speciálních konstrukcí transformátorů, jako je například Scottův transformátor nebo Leblancův transformátor. Nepříznivé vlivy napěťové nesymetrie, její možné odstranění nebo omezení a také její vypočet je podrobněji popsán v kapitole 3.

Ve čtvrté a zároveň poslední kapitole je vyhodnoceno měření na trakční transformovně Svitavy. Toto měření proběhlo ve dnech 2.3.2011 až 4.3.2011. Měření začalo první den zhruba 11:00 a skončilo poslední den v 10:38. V této kapitole jsou také podrobně zpracované grafy z naměřených veličin. Pro názornější zobrazení výsledků měření byl zvolen pouze časový interval trvající 24 hodin a to ze dne 3.3.2011 a potom ještě další dva čtyřhodinové intervaly v časech, kde byla velká hustota dopravy. Hodnota napěťové nesymetrie v časech, kdy dosahoval výkon nejvyšších hodnot, rovněž vzrostla. Pomocí funkce korelace byla prokázána závislost napěťové nesymetrie na výkonu. Tato závislost je nejvíce patrná právě v krátkých časových intervalech, kde byly také velké hodnoty výkonu. V celodenním časovém intervalu už korelace nevycházela tak dobře a vzájemná závislost posuzovaných veličin (výkonu a napěťové nesymetrie) vycházela pouze 0,594. V krátkých časových úsecích vycházela tato závislost lépe a to 0,695 a 0,822.

Celkově ale napěťová nesymetrie nedosahovala nijak velkých hodnot. Podle hodnoty předepsané normou ČSN EN 50 160 může napěťová nesymetrie dosahovat hodnoty maximálně 2%. Za celou dobu měření nebyla překročena hodnota napěťové nesymetrie 0,35%, což znamená, že síť v úseku Svitav je velice kvalitní. Dalším důvodem proč dosahovala napěťová nesymetrie tak malých hodnot může být fakt, že Svitavy nejsou žádný velký železniční uzel a tím pádem zde nejsou tak velké odběry a nesymetrie nedosahuje velkých hodnot.

Problematickou vlivů, které zpětně nepříznivě ovlivňují napájecí síť, jako jsou napěťová nesymetrie, vznik vyšších harmonických nebo vznik elektrolytické koroze kovových zařízení je nutné se zabývat i v budoucnu.

6 Použitá literatura

- [1] Paleček, J.: Napájení jednofázové vozby Českých drah z hlediska elektromagnetické kompatibility, VŠB-TUO, Ostrava 2000
- [2] ČSN EN 50160, Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z distribuční sítě
- [3] Dr Johan Driesen & Dr Thierry Van Craenenbroeck, Katholieke Universiteit Leuven: Úvod do nesymetrie. Překlad: Josef Gavlas, Miloslav Kužela, Pavel Santarius, FEI Technická univerzita Ostrava, Leden 2005.
- [4] Materiály napájecí stanice Svitavy
- [5] Denzer Jiří: Elektrická trakce1, Západočeská univerzita, 2000
- [6] Paleček,J., Kolář,V., Stýskala.V, Tran,K.H., Запysкая,T.: An analysis of the influence of electrified traction on power network, measuring unbalance. MET2009, Department of Electrical Engineering in Transport – Faculty of Electrical and Control Engineering – Gdańsk University of Technology. Gdańsk, Polsko, 24.-26.9.2009. Sborník str.39-42. ISBN 83-908116-2-6